



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

**“ SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS PSICROMÉTRICOS UTILIZANDO EL
LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA”**

Autores: Puzhi Morales Milton Vinicio

Zhinin Lazo Saúl Marcelo

Director: Ing. Edgar Gustavo Cardoso Martínez.

2014



UNIVERSIDAD DE CUENCA

RESUMEN

Múltiples procesos industriales y de acondicionamiento de aire dependen de las operaciones de humidificación, deshumidificación y secado, los mismos que están en función de varios parámetros psicrométricos como son: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, presión, etc. Su cálculo por ecuaciones resulta más o menos complejo, las soluciones gráficas son más prácticas, pero menos precisas. Surge como alternativa la creación de un modelo computarizado creado en función de una herramienta algorítmica que puede disminuir la complejidad y mejorar la precisión de estos cálculos.

En este estudio se desarrolla un software basado en el lenguaje Java para simular casos y métodos de cálculo de procesos de humidificación, deshumidificación, secado y mezcla de aire basado en las ecuaciones básicas de psicrometría para un amplio rango de temperaturas y a diferentes alturas sobre el nivel del mar.

Todo este conocimiento, será útil en el diseño y análisis de diferentes sistemas de almacenamiento y procesamiento de alimentos, también en procesos de meteorología, así mismo, resulta imprescindible en el diseño de sistemas tales como equipos de aire acondicionado para conservar alimentos frescos, secaderos de granos de cereal y torres de enfriamiento en plantas.

PALABRAS CLAVE: Psicrometría, humidificación, deshumidificación, secado, software, JAVA



ABSTRACT

Multiple industrial and air conditioning processes depend on the operations of humidification, dehumidification and drying, they are based on various psychrometric parameters such as temperature, relative humidity, absolute humidity, pressure, etc.. His calculation equations is more or less complex graphics solutions are more practical, but less accurate. Creating a computer model created based on an algorithmic tool that can reduce the complexity and improve the accuracy of these calculations is an alternative.

In this study based on the Java language to simulate cases and methods of calculation processes humidification, dehumidification, drying and air mixture based on the basic equations of psychrometric for a wide range of temperatures develops software and at different heights above the sea.

This knowledge will be useful in the design and analysis of different storage systems and food processing also meteorological processes, likewise, is essential in the design of systems such as air conditioning to preserve fresh food dryers cereal grains and plant cooling towers.

KEYWORDS: Psychrometrics, humidification, dehumidification, drying, software, JAVA



Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN Y PRINCIPIOS BÁSICOS	15
1.1 Termodinámica de una mezcla aire-vapor de agua	15
1.2 Aire seco y húmedo	18
1.3 Presión Atmosférica	21
2. PROPIEDADES DE LA MEZCLA AIRE-VAPOR DE AGUA	24
2.1 HUMEDAD	24
2.1.1 Humedad molar (W_M)	24
2.1.2 Humedad absoluta (W)	25
2.1.3 Humedad Relativa WR	26
2.1.4 Humedad Porcentual Wp	27
2.2 Temperatura de bulbo seco tbs	27
2.3 Temperatura de bulbo húmedo tbh	27
2.4 Temperatura de punto de rocío tr	31
2.5 Volumen específico del gas húmedo o volumen húmedo Vesp	31
2.6 Calor específico del gas húmedo o calor húmedo CH	32
2.7 Entalpía específica o húmeda (H)	32
2.8 Temperatura de saturación adiabática ts	33
3. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO	34
3.1 Representación gráfica	34
3.1.1 Humedad Absoluta	35
3.1.2 Temperatura de bulbo seco	36
3.1.3 Temperatura de bulbo húmedo	36
3.1.4 Temperatura de punto de rocío	37
3.1.5 Humedad relativa	37
3.1.6 Entalpía	38



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.1.7 Volumen específico.....	39
3.2 Manejo del diagrama psicrométrico.....	39
3.3 Representación de procesos.....	40
4. MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN.....	43
4.1 Mezcla de dos masas de gases húmedos.....	43
4.2 Adición de un vapor en condiciones de saturación.....	45
4.3 Adición de un líquido que se evapora totalmente en la masa gaseosa.....	46
4.4 Adición de un líquido en cualquier condición, en donde sólo se evapora una parte.....	47
4.5 Humidificación por contacto de una masa gaseosa con un sólido húmedo.....	49
4.6 Humidificación de una masa gaseosa por medio de un líquido que se encuentra a la temperatura de rocío de la masa gaseosa correspondiente a las condiciones de humedad de diseño.....	50
4.7 Humidificación adiabática de una masa gaseosa en contacto con un líquido.....	51
5. MÉTODOS DE DESHUMIDIFICACIÓN	55
5.1 Contacto Indirecto.....	55
5.2 Contacto directo con agua fría.....	57
5.3 Enfriamiento del agua por evaporación.....	59
5.4 Deshumidificación por medio de sustancias químicas.....	60
6 SIMULACIÓN DE PROCESOS	61
6.1 Introducción.....	61
6.2 Importancia de la simulación en la Ingeniería.....	61
6.3 Aplicaciones de la Simulación.....	62
6.4 Reseña de Java.....	63
6.5 Ventajas y desventajas de Java.....	64
6.6 Java vs otros lenguajes de programación.....	65
6.7 Funcionamiento de Java.....	65
6.8 Instalación de Java en los diferentes Sistemas Operativos.....	66
6.9 Entorno de desarrollo integrado (IDE).....	66
6.10 Aplicaciones de Java.....	67
7. MANUAL DE OPERACIÓN.....	70



UNIVERSIDAD DE CUENCA

7.1 Características generales del programa.....	70
7.2 Ejecución del programa.....	71
8. METODOLOGÍA DE TRABAJO	82
9. PROCEDIMIENTOS ESTADÍSTICOS DE ANÁLISIS DE DATOS	83
10. CONCLUSIONES	85
11. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	86
ANEXOS.....	88



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, MILTON VINICIO PUZHI MORALES, autor de la tesis "SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS PSICROMÉTRICOS UTILIZANDO EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de (título que obtiene). El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 21 de mayo de 2014

Milton Vinicio Puzhi Morales

0105469175



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, *Zhinin Lazo Saúl Marcelo*, autor de la tesis "SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS PSICROMÉTRICOS UTILIZANDO EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 21 de mayo de 2014

Zhinin Lazo Saúl Marcelo

C.I.: 0105507677



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, MILTON VINICIO PUZHI MORALES, autor de la tesis "SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS PSICROMÉTRICOS UTILIZANDO EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 21 de mayo de 2014

Milton Vinicio Puzhi Morales

0105469175



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, *Zhinin Lazo Saúl Marcelo*, autor de la tesis "SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS PSICROMÉTRICOS UTILIZANDO EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 21 de mayo de 2014

Zhinin Lazo Saúl Marcelo

C.I: 0105507677



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuenca, 16 de Abril de 2014

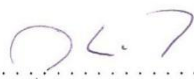
Ingeniero

Gustavo Cardoso.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Que el presente trabajo, denominado: **"SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS PSICROMÉTRICOS UTILIZANDO EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA"** realizado por los estudiantes: Puzhi Morales Milton Vinicio y Zhinin Lazo Saúl Marcelo; cumple con los requisitos establecidos en las normas generales para la Obtención del título de Ingenieros Químicos en la Universidad de Cuenca, tanto en el aspecto de forma como de contenido, por lo cual me permito autorizar su presentación para los fines pertinentes.

f). 

Ing. Gustavo Cardoso.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo principalmente a Dios, por habernos dado la vida y permitirnos haber llegado hasta este momento tan importante de nuestra formación personal. De igual manera a nuestros padres y familia en general, porque nos han brindado el apoyo incondicional y por compartir buenos y malos momentos



UNIVERSIDAD DE CUENCA

AGRADECIMIENTO

A Dios, por acompañarme todos los días y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis padres que me han apoyado en lo que me he propuesto y sobre todo han sabido corregir mis errores

También este trabajo lo dedico a una persona muy especial en mi vida, y aunque ya no se encuentre físicamente con migo, yo sé que en todo momento al desarrollar este trabajo estuvo conmigo, en las investigaciones, en mis desvelos, por eso a ti Mauricio, hermano querido te dedico mi esfuerzo donde te encuentres.

Milton Puzhi.

A Dios, por estas presente en todo momento de mi vida iluminando mi camino, para no desistir en este largo trayecto que he realizado. A mi padre, Antonio, Madre, Margarita, a mis Hermanos, Marco, Gustavo, Lucia y Margarita, por estar siempre pendiente en todo momento para brindar su apoyo incondicionalmente. A todos mis maestros de la facultad de Ciencias Químicas, a quienes les debo la mayoría parte de mis conocimientos. Finalmente a la prestigiosa Universidad de Cuenca, por haberme abierto sus puertas para poder cumplir mis sueños

Saúl Zhinin.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Conjunto

Al Ingeniero Gustavo Cardoso, nuestro director de tesis, por su colaboración en la realización de este proyecto.

Al Ingeniero Freddy Chablay por su ayuda brindada, apoyo y colaboración en el desarrollo de la investigación.

CONTENIDO TEÓRICO

1. INTRODUCCIÓN Y PRINCIPIOS BÁSICOS

1.1 Termodinámica de una mezcla aire-vapor de agua.

El agua es un compuesto vital para el desarrollo de los procesos biológicos que se efectúan en la tierra, su presencia en forma líquida, sólida o vapor, influye de forma importante en las condiciones climáticas. Los procesos físicos de evaporación, o sea la transición del estado líquido a vapor y el de condensación, el cambio del estado vapor a líquido, establecen mecanismos de adición y eliminación de humedad, provocando cambios en los diferentes sistemas ecológicos.

Para que el proceso de evaporación exista es necesario aplicar al líquido una cantidad de energía tal que permita vencer las fuerzas de atracción entre las moléculas del propio líquido. Lo anterior provoca la liberación de moléculas que salen al espacio gaseoso que las rodean (aire). La energía suministrada al líquido se conoce como el calor de vaporización, que no es otra cosa más que la cantidad de calor que hay que aplicar al líquido a una temperatura determinada para convertirlo en vapor.

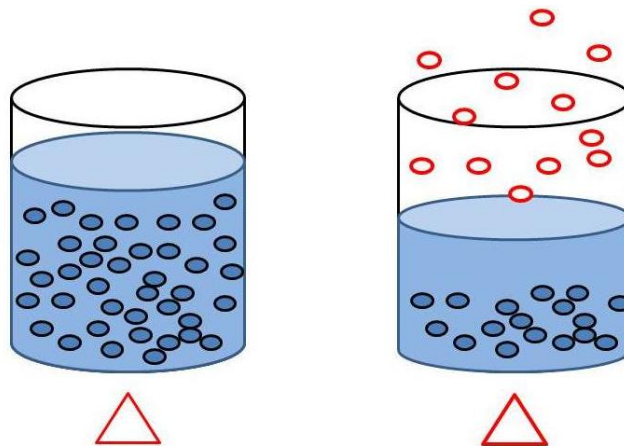


Fig. 1 Proceso de evaporización.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Al aumentar la temperatura en el líquido aceleramos el proceso de vaporización, es decir, habrá una mayor cantidad de vapor, presente en el gas, el proceso de evaporación continua hasta la última gota de líquido.

Si calentamos un líquido hasta su temperatura de ebullición, es decir la temperatura por encima de la cual, se convierte en vapor y este lo colocamos en un recipiente cerrado y lo aislamos térmicamente en pocas palabras realizamos un proceso "adiabático", podremos observar que bajo una condición de temperatura y presión, existe un número determinado de moléculas de líquido que se integraron a la fase vapor N_w y que por choques entre moléculas y las paredes del recipiente existe otro número determinado de moléculas de vapor que se condensan N_L y regresan al seno del líquido.

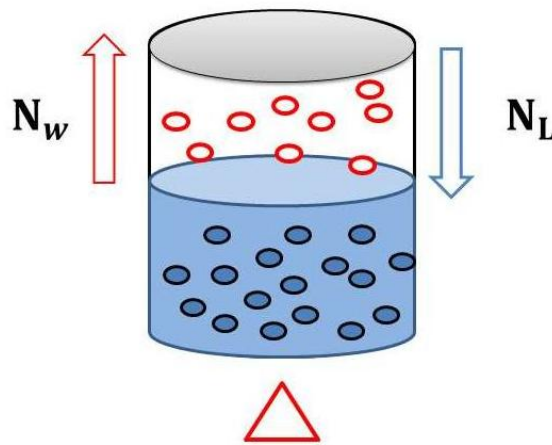


Fig.2 Equilibrio termodinámico.

Durante el proceso de evaporación el número de moléculas de líquido presentes en el gas irá en aumento y cuando se alcanza ciertas condiciones de temperatura y presión se obtiene un equilibrio, en el cual, el número de moléculas que salen del líquido por evaporación es igual al número de moléculas que entran por condensación,



UNIVERSIDAD DE CUENCA

lográndose un equilibrio termodinámico. Este equilibrio se obtiene para cada temperatura y presión.

Si representamos en un diagrama presión frente a temperatura tendremos lo siguiente:

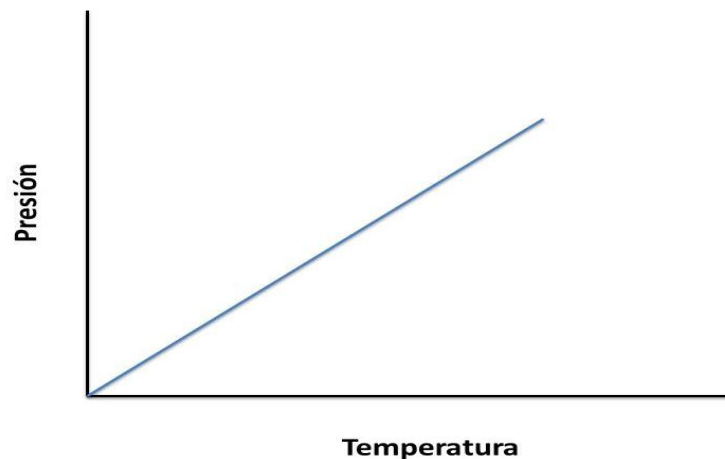


Fig. 3. Representación cartesiana de la temperatura vs presión

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)

Como habíamos mencionado anteriormente, para que el agua pase de un estado líquido a gaseoso o viceversa necesita un tiempo de transición, este fenómeno se conoce como saturación y ocurre en ciertas condiciones de temperatura y presión.

Para calcular la presión de saturación del agua con respecto a la temperatura, ASHRAE nos da la siguiente ecuación:

$$\ln p_w^* = \frac{\frac{C1}{T} + C2 + C3 \cdot T + C4 \cdot T^2 + C5 \cdot T^3 + C6 \cdot T^4 + C7 \cdot \ln T}{101325} \quad (1)$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

En donde:

p_w^* = presión de saturación del agua, atm.

T=Temperatura absoluta, °K

C=Constantes, sus valores se pueden ver en la siguiente tabla

Constantes	Rango de Temperaturas	
	-100°C a 0°C	0°C a 200°C
C1	-5.6745395E+0.3	-5.800205E+03
C2	6.3925247E+00	1.3914993E+00
C3	-9.6778430E-0.3	-4.8640239E-0.2
C4	6.2215701E-0.7	4.1764768E-0.5
C5	2.0747825E-0.9	-1.4452093E-0.8
C6	-9.4840240E-13	0.0000000E+00
C7	4.1635019E+00	6.5459673E+00

Tabla1. Constantes para el cálculo de la presión de saturación para distintos rangos de temperatura.

En el Anexo A se puede observar la tabla de las presiones de saturación.

(ASHRAE Handbook, 2001)

1.2 Aire seco y húmedo

El aire es una mezcla de gases que existe en la atmósfera, en el planeta Tierra existen primordialmente dos gases fundamentales: nitrógeno y oxígeno; los demás gases varían de acuerdo a varias condiciones como son por ejemplo la temperatura, contaminación, flora y fauna etc.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

En esta mezcla de gases, el aire contiene una pequeña cantidad de agua que puede ser de menor proporción que de los gases que conforman la mezcla y al margen de la cantidad relativa en la que se encuentre, no se la debe despreciar ya que su impacto termodinámico es muy importante, y se evidencia en su capacidad de absorber, retener y expulsar calor, además esta cantidad de agua varía fácilmente.

La cantidad de agua que puede retener el aire depende de condiciones ambientales como son la presión y la temperatura.

Por lo tanto, en psicrometría, el aire se divide en dos tipos: un aire que carece de agua y se forma por la mezcla de gases, que lo llamaremos como aire seco (a) y un aire real que contiene una proporción de agua al cual llamaremos aire húmedo o vapor de agua (w)

Diversas fuentes publican la proporción de los componentes del aire seco como se puede ver en la Tabla 2.

Componente	Porcentaje Volumétrico		
	ASHRAE ®	WIKIPEDIA®	ANGELFIRE®
Nitrógeno	78,0840	78.080	78.14
Oxígeno	20,9476	20.940	20.92
Dióxido de carbono	-	0.035	-
Argón	0.9340	-	0.94
Neón	0.0018	0.015	-
Helio	0.0005	-	-
Otros	0.0321	0.930	-

Tabla 2. Gases que componen el aire en la atmósfera.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Para propósitos generales no es necesaria mucha precisión de las proporciones de los componentes del aire seco, pero para otros fines como son, por ejemplo, limpieza y filtración, éstos datos son muy importantes, en especial la del dióxido de carbono ya que cada año aumenta su concentración debido a los residuos industriales.

Por lo tanto podemos decir que el aire seco se encuentra formado por 78% de nitrógeno y un 22% de oxígeno. La masa molecular del aire seco es la suma de las fracciones molares de cada gas que lo componen, en este caso nitrógeno con una masa molecular de 28Kg/Kmol y de oxígeno con 32Kg/Kmol, por lo tanto la masa molecular del aire seco es:

$$M_a = \frac{1}{\frac{0,78}{28} + \frac{0,22}{32}} = 28,8 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

De esta manera se calcula la constante del aire seco:

$$R_a = \frac{R}{M_a} = \frac{8,3143 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol} \cdot ^\circ\text{K}}}{28,8 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} = 0,2886 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}}$$

En donde R es la constante de los gases ideales.

(ASHRAE Handbook, 2001)

Las propiedades de las mezclas aire-vapor de agua, son estudiados por la psicrometría que significa "medición del frío". Estas propiedades permiten explicar los diferentes procesos para lograr las condiciones de bienestar en el cuerpo humano y las condiciones de conservación en los procesos industriales.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

1.3 Presión Atmosférica.

El vapor de agua posee un peso que genera una fuerza conocida como presión atmosférica. Esta presión es inversamente proporcional a la altura, esto quiere decir que a grandes altitudes, la presión disminuye respecto a lugares sobre el nivel del mar y existen lugares por debajo del nivel del mar en donde la presión atmosférica es aún mayor que la presión atmosférica sobre el nivel del mar.

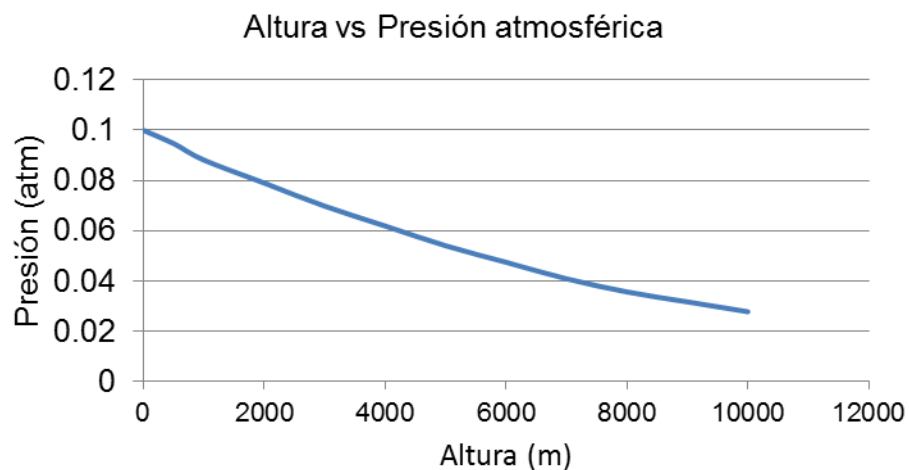


Fig.4. Variación de la presión con la altura

Para la medición de la presión atmosférica de un lugar, es necesario utilizar un instrumento conocido como barómetro cuyas unidades generalmente son milímetros de mercurio (mmHg) o atmósferas (atm).

Si se desconoce la presión atmosférica de un lugar y no se posee un barómetro, lo recomendable es aproximar la presión atmosférica mediante una fórmula matemática que depende directamente de la altura sobre el nivel del mar del lugar para el que se requiere estimar y la temperatura ambiente del mismo, de hecho, es aceptable considerar que la variación de la temperatura es despreciable y sólo trabajar con la altura.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

La ecuación para el cálculo de la presión atmosférica es la siguiente:

$$P = 1 - 2.25577 \times 10^{-5} \cdot Z^{5.2559} \quad (2)$$

La ecuación de la temperatura en función de la altura es:

$$t = 15 - 0.0065 \cdot Z \quad (3)$$

En donde:

Z=Altura, m

p=Presión atmosférica, atm.

t=Temperatura, °C

Estas ecuaciones son exactas a partir de -5000m a 11000m.

(ASHRAE Handbook, 2001)

En la tabla N°3 se muestra la presión atmosférica promedio de algunas ciudades del Ecuador.

Cuidad	Provincia	Altitud (m)	P(atm)
Tisaleo	Tungurahua	3254	0.66985751
Cañar	Cañar	3125	0.68098829
Guamote	Chimborazo	3060	0.68665329
El Ángel	Carchi	3007	0.69130063
Huaca	Carchi	3000	0.69191633
Pujilí	Cotopaxi	2947	0.69659248
Machachi	Pichincha	2945	0.69676944
Tulcán	Carchi	2930	0.69809778



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Saquisilí	Cotopaxi	2920	0.69898449
San Gabriel	Carchi	2905	0.70031625
Cevallos	Tungurahua	2892	0.70147211
Tabacundo	Pichincha	2877	0.70280771
Quito	Pichincha	2850	0.70521698
Cayambe	Pichincha	2830	0.70700593
Riobamba	Chimborazo	2764	0.71293556
Latacunga	Cotopaxi	2750	0.71419853
Salcedo	Cotopaxi	2683	0.72026781
Guaranda	Bolívar	2668	0.72163231
Cuenca	Azuay	2550	0.73243955
Azogues	Cañar	2518	0.7353928
Ambato	Tungurahua	2500	0.73705823
Sangolquí	Pichincha	2500	0.73705823
Ibarra	Imbabura	2228	0.76259889
Loja	Loja	224	0.97372633
Esmeraldas	Esmeraldas	37	0.99562103
Portoviejo	El Oro	36	0.99573917
Machala	El Oro	4	0.99952585
Guayaquil	Guayas	7	0.99917035

Tabla 3. Presiones de diferentes ciudades del Ecuador.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2. PROPIEDADES DE LA MEZCLA AIRE-VAPOR DE AGUA.

2.1 HUMEDAD.

Para expresar la concentración del vapor de agua en el aire se emplean diversos términos que definiremos a continuación.

2.1.1 Humedad molar (W_M).

Es la relación que existe entre los números de moles de vapor y de aire contenidos en una masa gaseosa.

$$W_M = \frac{n_w}{n_a} \quad (4)$$

(Ocón Tojo, 1976)

Si suponemos que el comportamiento de la mezcla cumple con la ley del gas ideal los números de moles se pueden expresar en términos de presiones parciales, por lo tanto tenemos que:

$$p_w V = n_w RT \quad (5)$$

$$p_a V = n_a RT \quad (6)$$

Despejando n_w de (5) y n_a de (6) tenemos:

$$n_w = \frac{p_w V}{RT} \quad (7)$$

$$n_a = \frac{p_a V}{RT} \quad (8)$$

Dividiendo (7) para (8) resulta que:

$$\frac{n_w}{n_a} = \frac{p_w}{p_a} \quad (9)$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

La presión total P ejercida por la mezcla es igual a la suma de la presión parcial del gas y la presión parcial del vapor, por lo tanto tenemos que:

$$P = p_a + p_w \quad (10)$$

Se tiene que la humedad molar es igual a

$$W_M = \frac{n_w}{n_a} = \frac{p_w}{p_a} = \frac{p_w}{P - p_w} = \frac{\text{moles}_w}{\text{moles}_a} \quad (11)$$

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)

2.1.2 Humedad absoluta (W)

Se define como la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco. Por lo tanto tenemos que:

$$W = \frac{m_w}{m_a} \quad (12)$$

$$W = \frac{18,01534}{28,9645} \frac{x_w}{x_a} = 0,622 \frac{x_w}{x_a} \quad (13)$$

Si consideramos como gas perfecto, las fracciones molares x_w y x_a se pueden expresarse de la siguiente manera

$$p_a V = n_a RT \quad (14)$$

$$p_w V = n_w RT \quad (15)$$

$$PV = nRT \quad (16)$$

La ecuación (16) puede escribirse como:

$$p_a + p_w \cdot V = n_a + n_w RT \quad (17)$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Dividiendo (14) para la ecuación (17)

$$\frac{p_a}{p_a + p_w} = \frac{n_a}{n_a + n_w} = x_a \quad (18)$$

Y dividiendo (15) para la ecuación (17)

$$\frac{p_w}{p_a + p_w} = \frac{n_w}{n_a + n_w} = x_w \quad (19)$$

Entonces de las ecuaciones (18), (19) y teniendo en cuenta (13) tenemos que la humedad absoluta es igual a:

$$W = 0,622 \cdot \frac{p_w}{P - p_w} = \frac{K_{g_w}}{K_{g_a}} \quad (20)$$

(R. Paul Singh Deniss, R. Heldman, 1993)

2.1.3 Humedad Relativa W_R

El vapor de agua que se encuentra presente en el aire húmedo tiene una presión parcial determinada p_w , si el aire estuviese saturado de humedad se tendría otra presión p_w^* a la misma temperatura que se denomina presión de saturación, la relación de ambas presiones se define como humedad relativa.

$$\% W_R = \frac{p_w}{p_w^*} \cdot 100 \quad (21)$$

La humedad relativa se expresa generalmente en tanto por ciento, tal como 50% 75%, 35% etc.

(Angel L. Miranda, 2009)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2.1.4 Humedad Porcentual W_p

La humedad porcentual se define como la relación entre la humedad de la masa gaseosa y la humedad que existiría si estuviese saturada.

$$W_p = \frac{W}{W^*} = \frac{p_w}{p_w^*} \cdot \frac{P - p_w^*}{P - p_w} \quad (22)$$

(Ocón Tojo, 1976)

2.2 Temperatura de bulbo seco t_{bs}

La temperatura de bulbo seco, es la verdadera temperatura del aire húmedo y frecuentemente se le denomina como temperatura del aire que se registra con un termómetro común. Se llama temperatura seca a la temperatura del aire, prescindiendo de la radiación calorífica de los objetos que rodean ese ambiente y de los efectos de la humedad relativa y de los movimientos del aire. Se puede obtener con el termómetro de mercurio, respecto a cuyo bulbo, reflectante y de color blanco brillante, se puede suponer razonablemente que no absorbe radiación.

2.3 Temperatura de bulbo húmedo t_{bh}

La temperatura de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

La temperatura de bulbo húmedo es igual a la temperatura de bulbo seco cuando la muestra de aire está saturada de agua. Básicamente, un termómetro de bulbo húmedo no es diferente a un termómetro ordinario, excepto que tiene una mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo, si esta mecha está humedecida con agua, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura del termómetro. Esta temperatura se conoce como temperatura de bulbo húmedo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Las temperaturas de bulbo seco y húmedo se pueden determinar experimentalmente por medio de un psicrómetro que es un instrumento que tiene dos termómetros de mercurio idénticos, uno con el bulbo descubierto para medir la temperatura del aire y el otro con el bulbo cubierto con una gasa higroscópica humedecida.

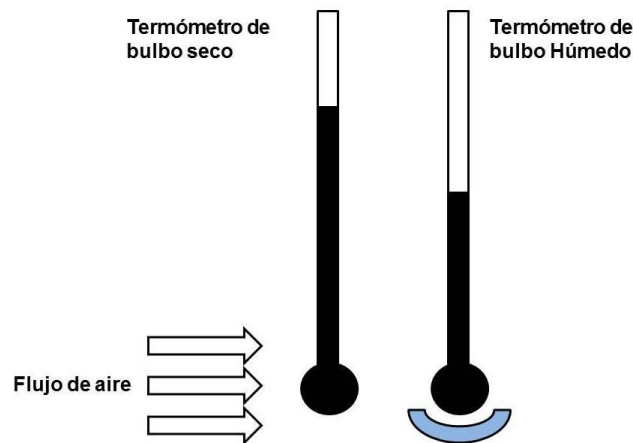


Fig. 5. Termómetro de bulbo húmedo y seco

El mecanismo es el siguiente: el psicrómetro se hace girar o se le induce una corriente de aire provocando de esta manera un enfriamiento y la temperatura del termómetro cubierto desciende rápidamente hasta alcanzar un valor estacionario. La lectura registrada en este punto es la temperatura de bulbo húmedo representando por lo tanto la temperatura de equilibrio de flujos de calor entre el aire y la gasa por calor sensible y las pérdidas de calor producidas por la evaporación del líquido en el aire.

Estas pérdidas de calor provocan una disminución en la temperatura, la diferencia entre estas dos temperaturas dependerá del grado de saturación del aire. Entre más húmedas contenga, esta diferencia será mucho menor y en condiciones de saturación, la temperatura de bulbo seco será igual a la de bulbo húmedo. Con el conocimiento de estas dos temperaturas es posible calcular el valor de la humedad relativa.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

(Dry Bulb, Wet Bulb and Dew Point Temperature. Obtenida el 29 de Noviembre del 2012, de http://www.engineeringtoolbox.com/dry-wet-bulb-dew-point-air-d_682.html)

Matemáticamente la temperatura húmeda se puede determinar a partir de las siguientes ecuaciones.

$$p_{tbh}^* - p_w = \frac{h_c}{K_G \cdot M_w \cdot \lambda_{tbh}} t - t_{bh} \quad (23)$$

$$W_{tbh} - W = \frac{\frac{h_c}{K_w}}{\lambda_{tbh}} t - t_{bh} \quad (24)$$

En donde:

p_{tbh}^* , λ_{tbh} , W_{tbh} = presión de saturación del vapor, calor latente de vaporización y humedad absoluta respectivamente referidas a la temperatura de bulbo húmedo.

h_c = coeficiente de convección líquido-gas.

K_G = coeficiente de transporte de materia, tomando como potencial de difusión la presión de vapor.

K_w = coeficiente de transporte de materia, tomando como potencial de difusión la saturación absoluta.

M_w = masa molecular del vapor de agua.

t = temperatura de la masa gaseosa.

t_{bh} = temperatura de bulbo húmedo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Para el caso de la mezcla aire-agua, el coeficiente $\frac{h_c}{K_G \cdot M_w \cdot \lambda_{tbh}}$ vale aproximadamente 0.5, por lo tanto se puede determinar t_{bh} de acuerdo con la ecuación (25) que se la conoce como *ecuación psicrométrica*.

$$p_w^* - p_w = 0.5 \cdot t - t_{bh} \quad (25)$$

El cociente $\frac{h_c}{K_w}$ se denomina coeficiente psicrométrico y puede determinarse por la siguiente expresión:

$$\frac{h_c}{K_w} = c \cdot \frac{Sc}{Pr}^{0.56} \quad (26)$$

En donde:

Sc = Módulo adimensional de Schmidt, cuyo valor es:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

μ = Viscosidad absoluta, Kg/hm

ρ = Densidad, Kg/m³

D = Difusividad, m²/h

Pr = Módulo adimensional de transmisión de calor por convección de Prandtl, cuyo valor es:

$$Pr = \frac{C\mu}{K}$$

C = Calor específico, Kcal/ Kg·°C

K = Conductividad, Kcal/mh°C.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Sus valores para mezclas de aire con diferentes vapores son:

Agua	0.222	Sulfuro de carbono	0.359
Metanol	0.293	Benceno	0.4
Etanol	0.345	Acetato de etilo	0.412
Propanol	0.373	Tolueno	0.415
Butanol	0.412	Cloro benceno	0.453

(Ocón Tojo, 1976)

2.4 Temperatura de punto de rocío t_r

Es la temperatura a la cual es preciso enfriar (a humedad constante) una mezcla de vapor-gas para que éste se sature.

(McCabe, Smith y Harriott, 2007)

Existen varios instrumentos para determinar el punto de rocío, pero es aconsejable determinar a partir de la temperatura de bulbo seco y de la humedad relativa, con ayuda de una carta psicrométrica.

(Angel L. Miranda, 2009)

2.5 Volumen específico del gas húmedo o volumen húmedo V_{esp}

Se define como el volumen ocupado por la mezcla la cual contiene 1 Kg de gas y viene dado por la siguiente fórmula:

$$V_{esp} = \frac{1}{M_a} + \frac{W}{M_w} = \frac{RT}{P} \quad (27)$$

Para el caso de la mezcla aire-vapor de agua, el volumen específico viene dado por:

$$V_{esp} = \frac{1}{29} + \frac{W}{18} = \frac{0,082T}{P} = \frac{m^3}{Kg \text{ aire}} \quad (28)$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2.6 Calor específico del gas húmedo o calor húmedo C_H

El calor específico que corresponde a una mezcla vapor-gas, se define como el calor que hay que suministrar a una unidad másica de gas y al vapor que contiene, para elevar un grado de temperatura, manteniendo la presión constante de acuerdo a la relación siguiente:

$$C_H = c_{pa} + c_{pw} * W \quad (29)$$

Para el caso aire-vapor de agua:

$$C_H = 0,24 + 0,46 * W = \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg aire} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (30)$$

2.7 Entalpía específica o húmeda (H)

Es la suma tanto del calor sensible de 1 Kg de gas, y el calor latente de vaporización del vapor que contiene a la temperatura a la que se refiere las entalpías, por lo tanto tenemos que:

$$H = C_H \cdot t - t_o + \lambda_o * W \quad (31)$$

Para la mezcla aire-agua, tomando como entalpía de referencia la del agua líquida a 0°C tenemos que:

$$H = 0,24 + 0,46 \cdot W \cdot t + 597,2 \cdot W = \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \quad (32)$$

2.8 Temperatura de saturación adiabática t_s

Es la temperatura que alcanza una masa de gas húmeda cuando está en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas.

Esta temperatura se puede calcular con la expresión siguiente:

$$W_{ts} - W = \frac{C_H}{\lambda_{ts}} t - t_s \quad (33)$$

En donde W_{ts} es la humedad de saturación a la temperatura de saturación adiabática, λ_{ts} es el calor latente de vaporización del líquido a t_s y c_p es el calor específico de la masa húmeda.

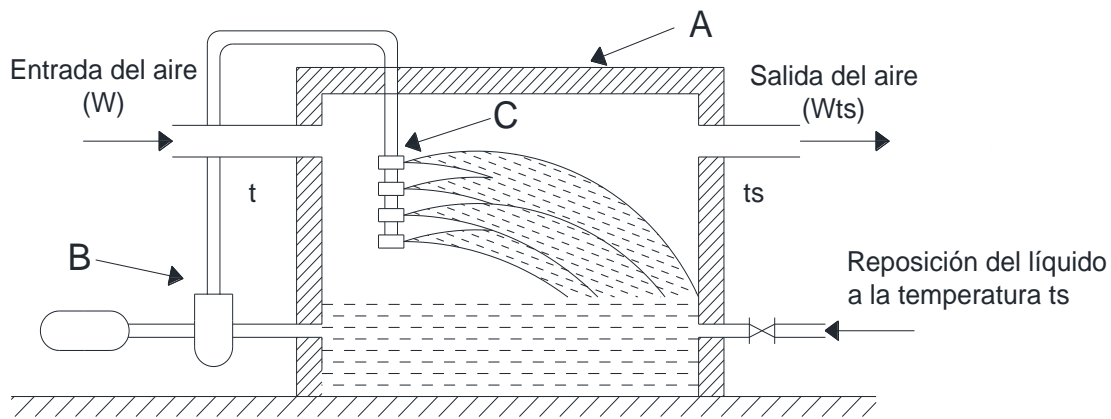


Fig. 6. Saturador adiabático: A, cámara de pulverización; B, bomba de circulación; C, pulverizadores

Para el caso aire-vapor de agua, el valor de la temperatura húmeda y el de la temperatura de saturación adiabática coinciden y en este caso se toma indistintamente una u otra.

(Ocón Tojo, 1976)



3. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

3.1 Representación gráfica

El diagrama psicrométrico es la representación gráfica de las ecuaciones analíticas descritas anteriormente. En la figura 7 se observa el diagrama para una mezcla aire-vapor de agua.

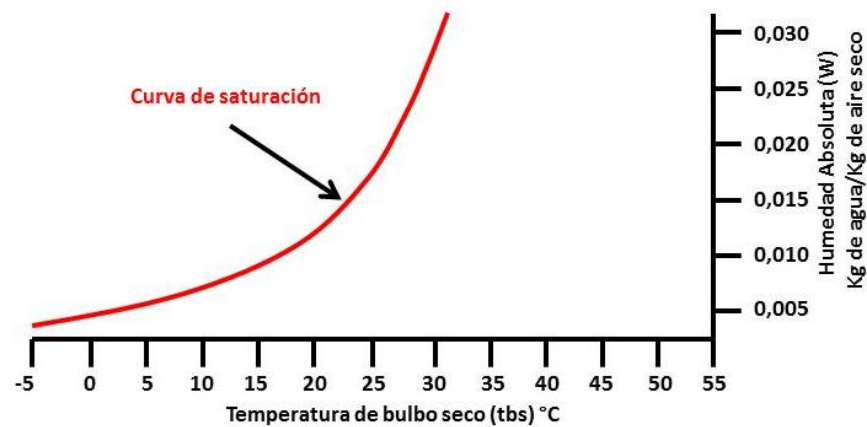


Fig. 7. Mezcla aire-vapor de agua

En el diagrama se representa la temperatura de bulbo seco en el eje de la abscisa y en el eje de las ordenadas se representa la humedad absoluta, este gráfico está limitado por la curva de humedad relativa al 100% que en este caso es la curva de saturación.

Los puntos que se encuentran localizados a la izquierda de la curva de saturación, representan mezclas de aire saturado con agua en estado líquido lo cual originan las nieblas y por lo tanto son condiciones inestables de aire-vapor de agua. Los puntos que se encuentran a la derecha de la curva de saturación son mezclas bien definidas de aire-vapor de agua que corresponden a condiciones de recalentamiento.

(Ocón Tojo, 1976)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Las distintas magnitudes que se han de representar en un diagrama psicrométrico son las siguientes:

- Humedad Absoluta
- Temperatura de bulbo seco
- Temperatura de bulbo húmedo
- Temperatura de punto de rocío
- Humedad relativa
- Entalpía específica
- Volumen específico

3.1.1 Humedad Absoluta

La humedad absoluta es la escala vertical (ordenada) la cual se encuentra a lado derecho del diagrama psicrométrico, estas líneas corren horizontalmente de derecha a izquierda como muestra la siguiente figura:

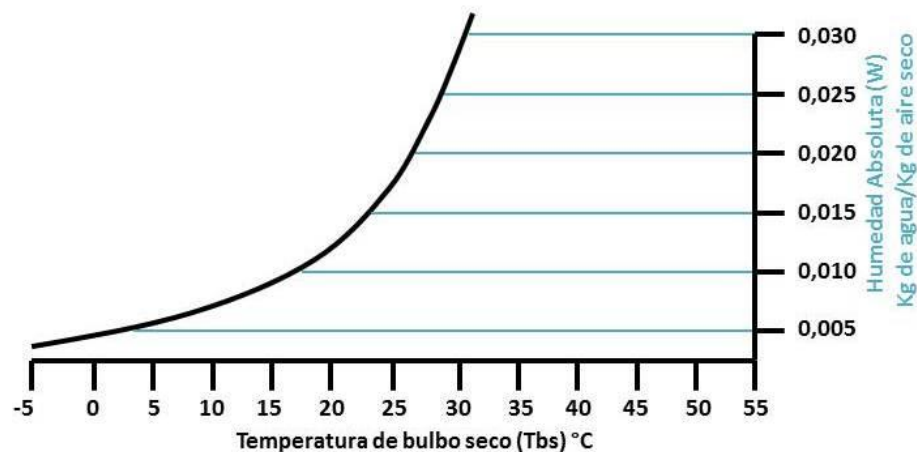


Fig. 8 Líneas de humedad absoluta



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.1.2 Temperatura de bulbo seco

Para la representación de las líneas de temperatura de bulbo seco se trazan líneas paralelas al eje de la humedad absoluta como lo indica la figura siguiente:

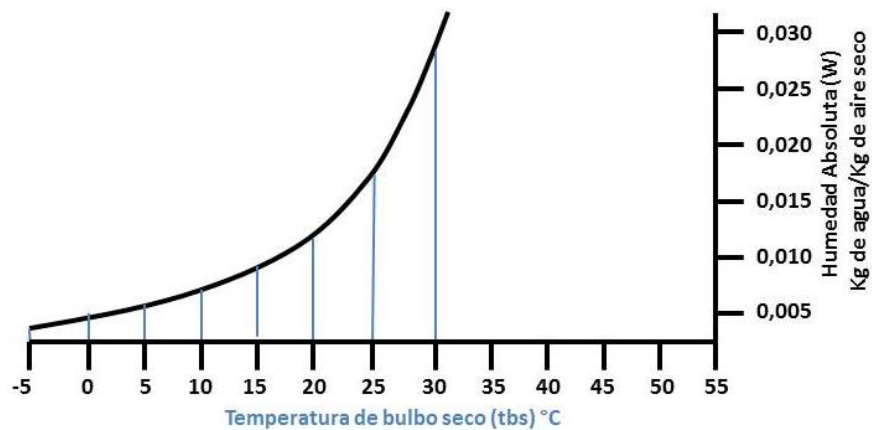


Fig.9. Líneas de temperatura de bulbo seco.

3.1.3 Temperatura de bulbo húmedo.

Las líneas inclinadas de pendiente negativa corresponden a las isoterms de saturación adiabática las cuáles coinciden con las de la temperatura de bulbo húmedo para el caso aire-vapor de agua.

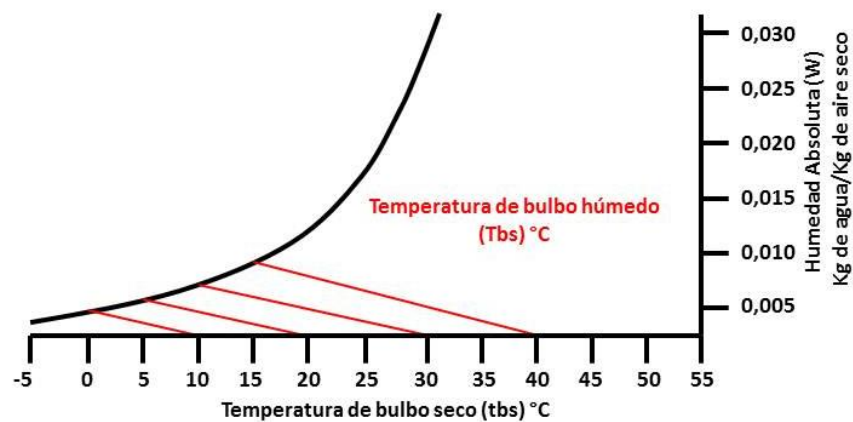


Fig.10. Líneas de temperatura de bulbo húmedo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.1.4 Temperatura de punto de rocío

Es la temperatura que el aire húmedo va lentamente enfriando, llegando sobre la curva de saturación. Esta temperatura del aire provoca la aparición de nieblas que reposan en forma de rocío sobre los alrededores.

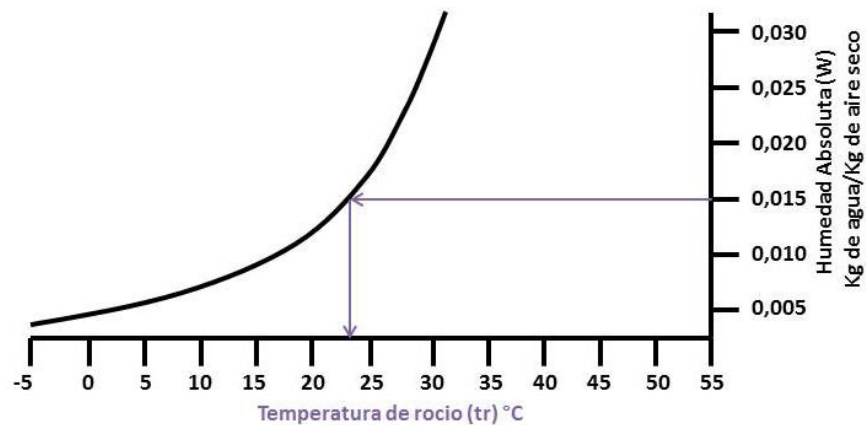


Fig.11. Temperatura de rocío

3.1.5 Humedad relativa.

Las curvas localizadas entre el eje de las abscisas y la curva de saturación son las isolíneas de la humedad relativa que su valor disminuye a medida que se alejan de la curva de saturación,



UNIVERSIDAD DE CUENCA

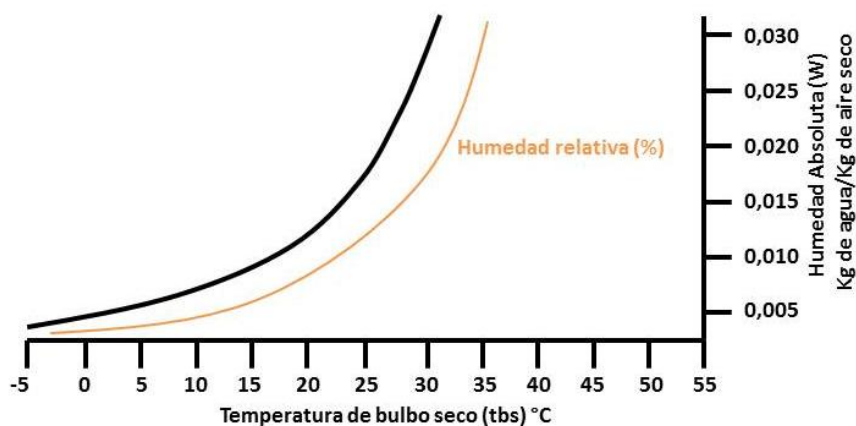


Fig.12. Curvas de humedad relativa

3.1.6 Entalpía.

Las líneas de entalpía constante son las mismas que se la temperatura de bulbo húmedo y la escalas de medidas está situadas fuera del diagrama en la parte superior del mismo.

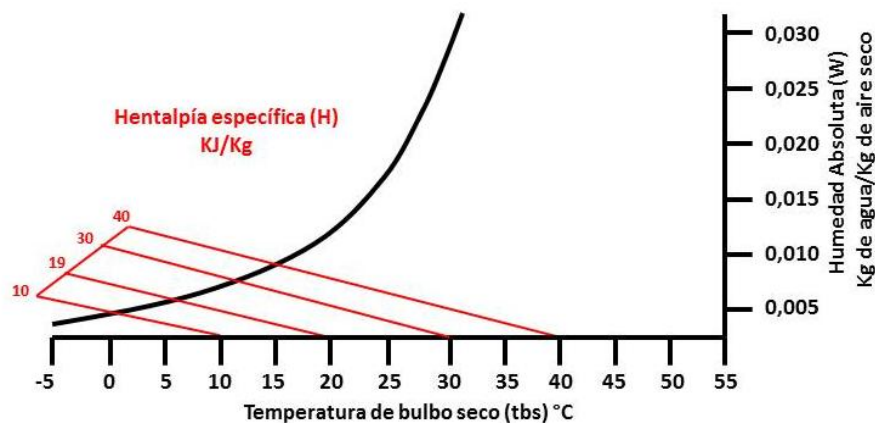


Fig. 13. Líneas de entalpía específica



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.1.7 Volumen específico.

Para el caso del volumen específico no existe una escala, en este caso existen unas líneas referenciales paralelas, las de mayor inclinación que salen por la parte inferior están valorados a saltos de $=0,025$ y la última vale 0.9

(ASHRAE Handbook, 2001)

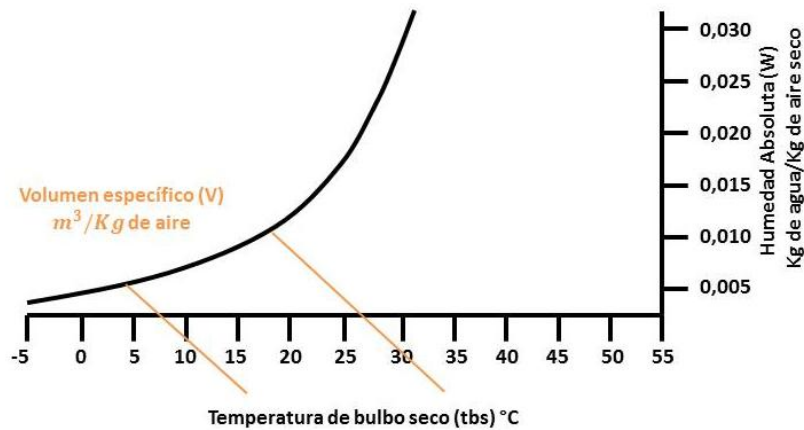


Fig.14. Líneas de volumen específico

3.2 Manejo del diagrama psicrométrico.

Para poder determinar un punto sobre el diagrama psicrométrico, es necesario conocer al menos dos de las cinco variables: t_{bs} , t_{bh} , t_r , W y H_R , en este caso cabe destacar que para su lectura, tanto W como t_r no deben estar juntas. Si fijamos el punto (1) en el diagrama de la fig. 15 la determinación de sus propiedades se efectúa de la siguiente manera:

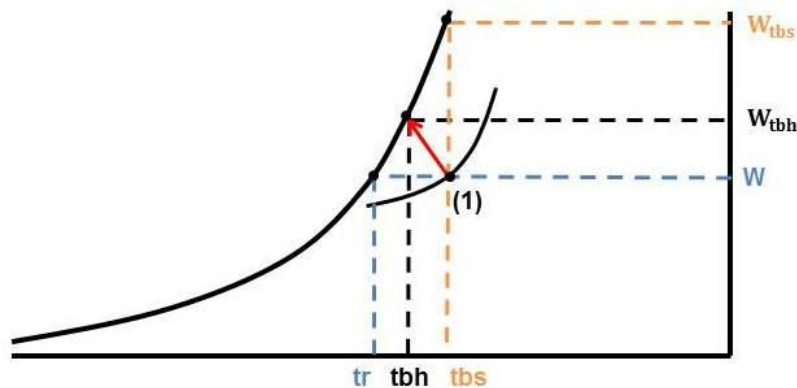


Fig. 15. Determinación de las propiedades de una mezcla aire-vapor de agua, en un diagrama psicrométrico.

- La ordenada del punto (1) corresponde a la humedad absoluta (W) y su abscisa es la temperatura de bulbo seco t_{bs} .
- La abscisa de este punto que tiene la misma ordenada en W hasta las condiciones de saturación, corresponde a la temperatura de rocío t_r .
- La abscisa del punto de intersección de la línea de pendiente negativa que pasa por el punto (1) con la curva de saturación, es la temperatura de saturación adiabática o la temperatura de bulbo húmedo t_{bh} la cual corresponde la ordenada W_{tbh} .
- Prolongando la vertical que pasa por (1) hasta la curva de saturación, la ordenada del punto de intersección es la humedad de saturación del aire a la temperatura t_{bs} .
- La humedad relativa del punto en cuestión se obtiene leyendo directamente sobre la isolínea correspondiente.

3.3 Representación de procesos.

El diagrama psicrométrico se puede representar procesos como calentamiento o enfriamiento a humedad y presión constante o los mismos procesos a humedad variable, tal como lo muestra la figura 16 y 17. También se pueden trazar procesos de

humidificación adiabática representado en la fig. 18 y de mezclas de aires de la figura 19.

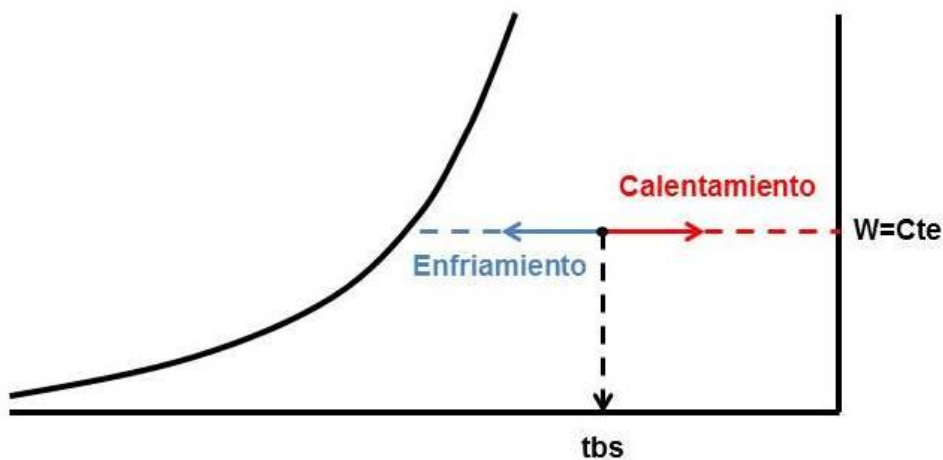


Fig. 16. Calentamiento o enfriamiento sensible

En la fig. 17 está representado un proceso que se caracteriza por un aumento o disminución del contenido de humedad del aire, permaneciendo constante la temperatura de bulbo seco.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)

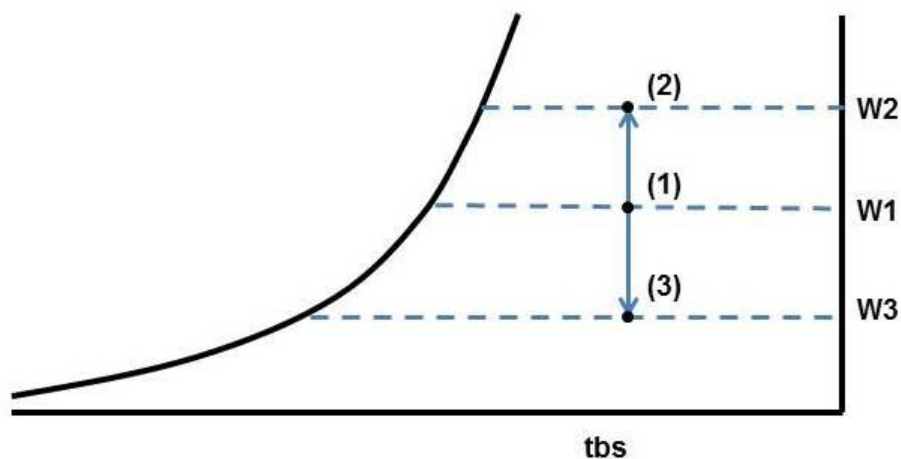


Fig. 17. Variaciones latentes

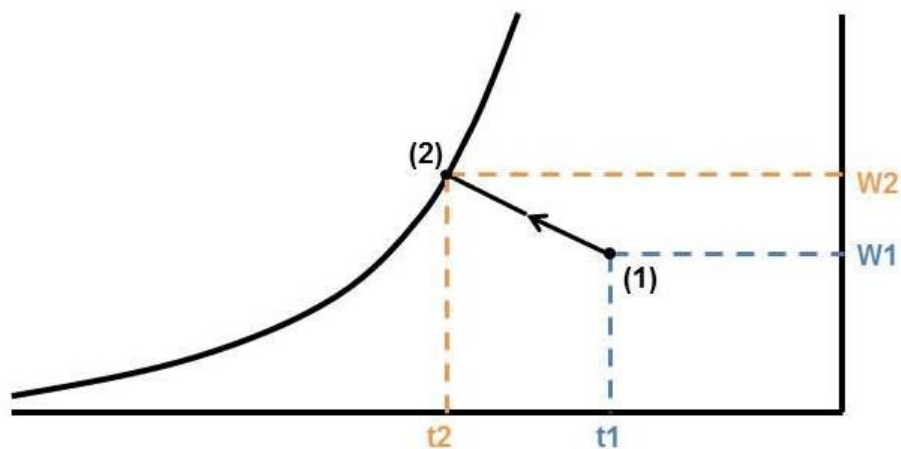


Fig.18. Representación de una humidificación adiabática.

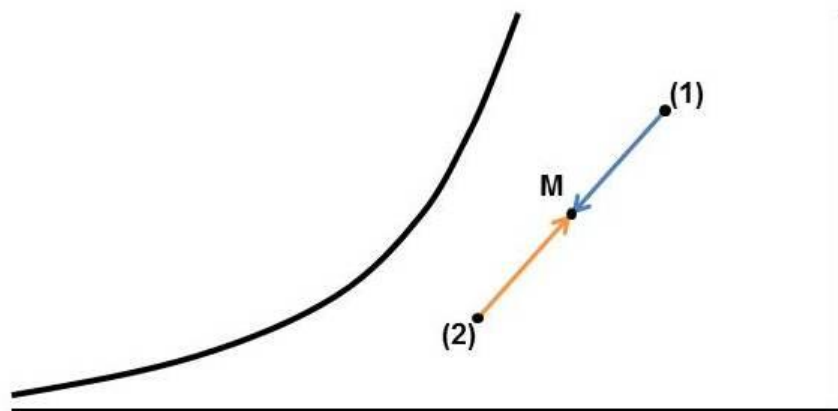


Fig.19. Representación de rectas de unión para mezclas de aire.

4. MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN.

En humidificación existen diversos métodos por el cual se puede humidificar el aire. En la mayoría de los casos, la masa de aire se pone en contacto con líquidos, sólidos húmedos o con masas de aire húmedo. La mayoría de los métodos son simples, a excepción de la humidificación adiabática la cual requiere ciertas condiciones especiales.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)

4.1 Mezcla de dos masas de gases húmedos.

Este método consiste en mezclar adiabáticamente masas de gases húmedos que contienen humedades diferentes. El cálculo de las condiciones en que queda la masa de gas resultante puede efectuarse de una manera sencilla en función de las condiciones iniciales de las dos corrientes gaseosas, que indicamos por: W_1 , W_2 , H_1 , H_2 , t_1 , t_2 y G_1 , G_2 (Siendo estas últimas las masas de aire húmedo).

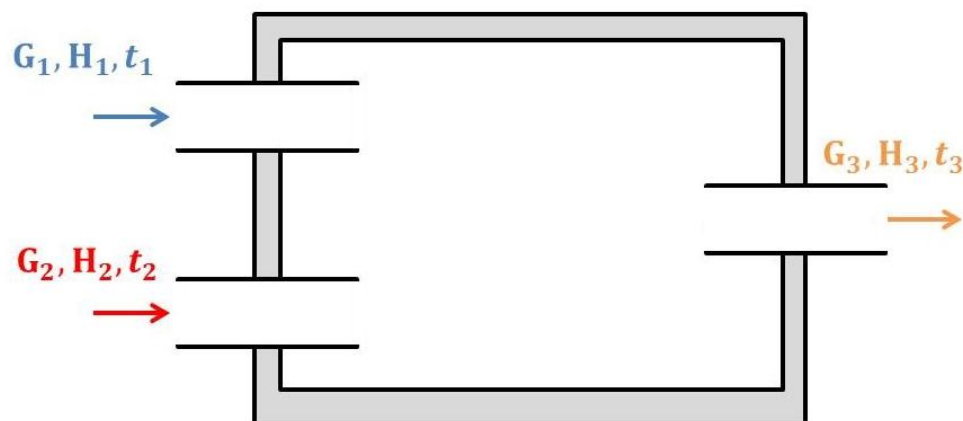


Fig.20. Cámara de mezcla adiabática.

Las condiciones finales de la mezcla se determinan efectuando un balance de materia y entalpía aplicado a toda la masa, y un balance de materia referido al vapor,



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Llegamos a las expresiones finales siguientes que nos permiten calcular la masa de gas G_3 , la humedad W_3 , la entalpía H_3 y la temperatura t_3 de la masa resultante:

$$G_3 = G_1 + G_2 = Kg \quad (34)$$

$$W_3 = \frac{G \cdot W_1 + G \cdot W_2}{G_1 + G_2} \quad (35)$$

$$\frac{W_3 - W_1}{H_3 - H_1} = \frac{W_3 - W_2}{H_3 - H_2} \quad (36)$$

$$H_3 = \frac{G \cdot H_1 + G \cdot H_2}{G_1 + G_2} \quad (37)$$

$$t_3 = \frac{G \cdot t_1 + G \cdot t_2}{G_1 + G_2} \quad (38)$$

Las condiciones de aire húmedo resultante se encuentran sobre el diagrama psicrométrico, en la recta de unión de los dos puntos representativos de las masas mezcladas.

(Ocón Tojo, 1976)

En la figura 21 el punto 1 representa la condición de una masa gaseosa y el punto 2 la de la otra masa gaseosa en contacto. Estos dos puntos se unen por medio de una línea recta. El punto 3 sobre la línea representa la condición final de la mezcla. La posición del punto 3, depende del porcentaje de cada masa gaseosa presente en la mezcla. Mientras mayor sea 1, más cerca estará de 3 y de 2 si ocurre lo contrario.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

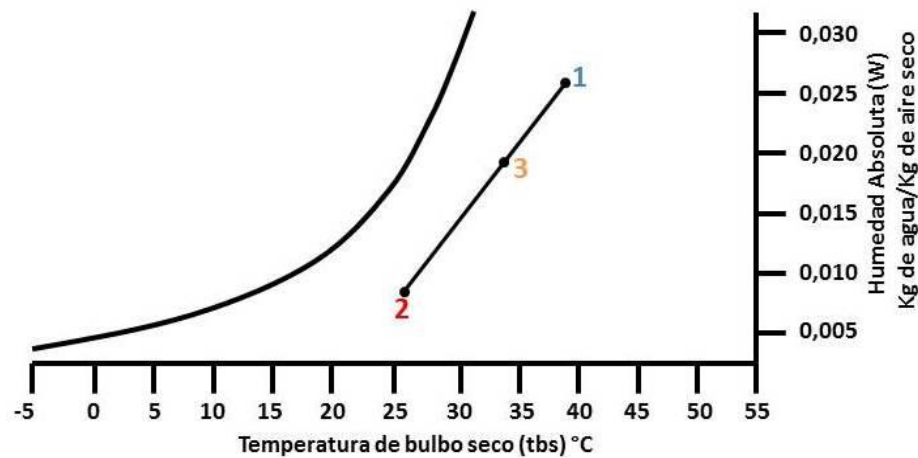


Fig.21. Representación de una mezcla de masas gaseosas.

La mezcla de masas gaseosas podría resultar interesante dependiendo del punto de vista económico, ya que es posible mezclar el aire exterior con el aire de

retorno. El aire resultante de esta mezcla tendrá una temperatura más baja que el aire exterior, economizando energía en la máquina de enfriamiento.

Existen casos en los cuales no se puede utilizar el aire de retorno, ya que siempre se requiere aire fresco. Este es el caso de algunas áreas de centros hospitalarios.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)

4.2 Adición de un vapor en condiciones de saturación

En este proceso a una masa de gas húmedo G en las condiciones W_1, H_1, t_1 , se le adiciona una masa de vapor saturado G^* con una entalpía H_w . Al realizar un balance de materia y energía, se obtienen las expresiones finales siguientes:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$W = W_1 + \frac{G^*}{G} \quad (39)$$

$$H = H_1 + H_w \cdot W - W_1 \quad (40)$$

En donde W y H son la humedad y entalpía de la mezcla resultante.

Como en el caso anterior, este proceso se puede representar en un diagrama psicrométrico y las condiciones de la mezcla resultante sobre la recta de unión de los puntos representativos del vapor saturado y el gas húmedo.

(Ocon Tojo, 1976)

4.3 Adición de un líquido que se evapora totalmente en la masa gaseosa.

La adición de un líquido provoca que la masa gaseosa disminuya su temperatura, ya que el aire cede su calor sensible al líquido para provocar su evaporación, por lo que se produce su enfriamiento. En el caso de la adición de vapor saturado existe un calentamiento de la masa gaseosa debido al calor sensible del vapor.

Es claro que el abatimiento de temperatura es mucho más rápido con el contacto con un líquido que con un vapor debido básicamente a la diferencia importante entre el calor latente de vaporización del líquido y el calor sensible.

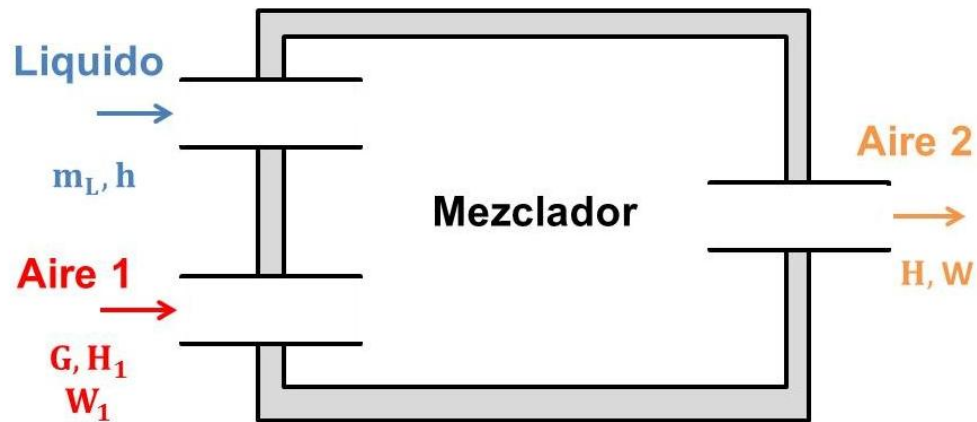


Fig.22. Cámara de mezcla aire-líquido.

En este caso, las relaciones para el cálculo de las condiciones finales son análogas a las del caso anterior, solo se sustituyen las condiciones del vapor saturado por las del líquido.

$$W = W_1 + \frac{m_L}{G} \quad (41)$$

$$H = H_1 + h \cdot W - W_1 \quad (42)$$

En donde W y H son la humedad y entalpía de la mezcla resultante.

4.4 Adición de un líquido en cualquier condición, en donde sólo se evapora una parte.

Consideremos la masa G que pasa de las condiciones W_1, H_1 , a las condiciones W_2, H_2 mientras que la cantidad de líquido inicial m_{L1} pasa de t_1 a t_2 disminuyendo su masa hasta m_{L2} . Por aplicación de un balance de materia y un balance entálpico llegamos a las siguientes expresiones:

$$G W_2 - W_1 = m_{L1} - m_{L2} \quad (43)$$

$$\frac{W_2 - W_1}{H_2 - H_1} = \frac{m_{L1} - m_{L2}}{m_{L1} \cdot h_1 - m_{L2} \cdot h_2} \quad (44)$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Siendo h_1 y h_2 las entalpías inicial y final del líquido.

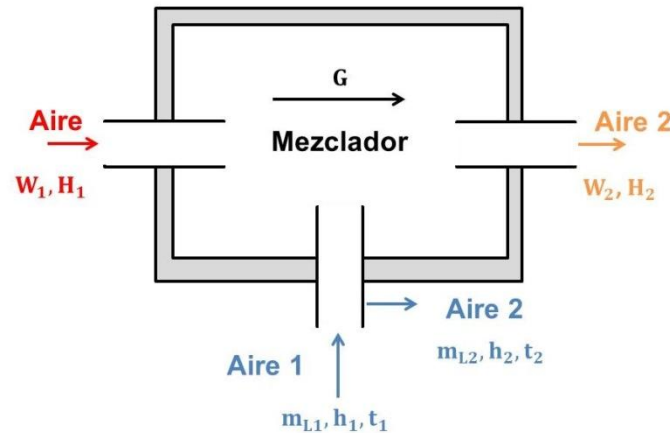


Fig.23. Cámara de mezcla de adición de líquido.

El proceso de adición del líquido puede variar en función de las condiciones del líquido. En la figura están representados tres procesos de humidificación: condición de agua caliente, con adición de agua fría y con adición de agua muy fría

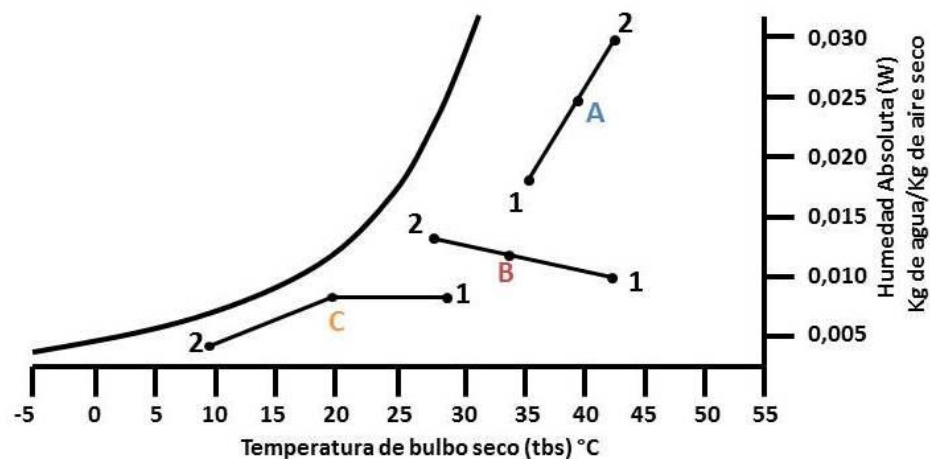


Fig.24. Proceso de adición de líquido.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002).

4.5 Humidificación por contacto de una masa gaseosa con un sólido húmedo.

Este es un proceso en donde el sólido transfiere humedad al aire, secando el sólido y humidificando el aire. En este proceso el sólido se introduce en un secador a la temperatura t_{s1} , con una humedad W_{s1} , y se obtiene a una temperatura t_{s2} , con una humedad W_{s2} . Siendo m_s la cantidad de sólido que entra y sale del secador, si la masa G que entra al secador con una temperatura t_1 con una humedad W_1 y sale con una humedad W_2 a una temperatura t_2 .

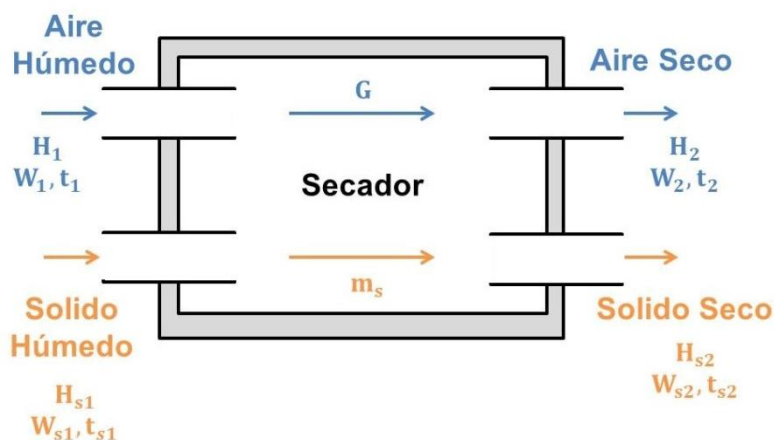


Fig.25. Diagrama de un secador.

El balance de masa es la siguiente

$$G W_2 - W_1 = m_s W_{s1} - W_{s2} \quad (45)$$

La realización de un balance entálpico, considerando el proceso adiabático, tenemos la siguiente expresión

$$G H_1 - H_2 = m_s H_{s2} - H_{s1} \quad (46)$$

En donde H_s es la entalpía del sólido definido (respecto a 0°C) mediante la siguiente expresión:

$$H_s = C_s + W_s \cdot C_L t_s + H_0 \quad (47)$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Siendo:

C_s =Calor específico del sólido seco

C_L =Calor específico del líquido de acompaña al sólido

H_0 =Calor integral de la mezcla del sólido, referido a 0°C.

Si el proceso no es adiabático es decir intercambia calor con el medio, el balance de energía es el siguiente:

$$G H_1 - H_2 = m_s H_{s2} - H_{s1} - q \quad (48)$$

Siendo q el calor intercambiado.

(Ocón Tojo, 1976)

4.6 Humidificación de una masa gaseosa por medio de un líquido que se encuentra a la temperatura de rocío de la masa gaseosa correspondiente a las condiciones de humedad de diseño.

En este caso, si tenemos aire en las condiciones A t_A, W_A y queremos llevarlo hasta las condiciones B t_B, W_B , ha de ponerse en contacto con agua que se mantenga a la temperatura C t_C, W_C .

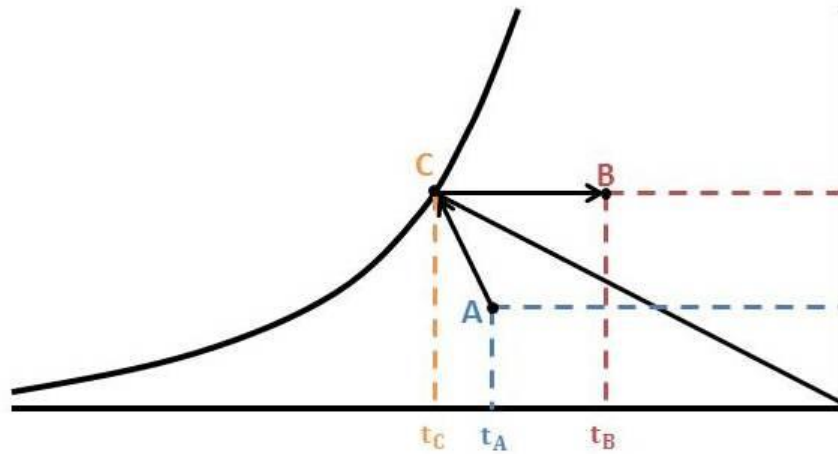


Fig.26. Proceso de humidificación de un gas en contacto con un líquido.

Para mantener el agua a esa temperatura se tiene que suministrársele igual cantidad de calor que la que absorberá el aire en forma de calor latente al humidificarse. El aire pasará directamente de las condiciones A a las C, y fuera del contacto del agua hay que suministrarle después el calor necesario para llevarlo de C a B.

4.7 Humidificación adiabática de una masa gaseosa en contacto con un líquido.

Este método de humidificación del aire más empleado en la práctica industrial. En este proceso consiste en el contacto de una masa gaseosa con un líquido para alcanzar las condiciones de saturación adiabática. El líquido que entra en el humidificador se encuentra a la temperatura de saturación adiabática.

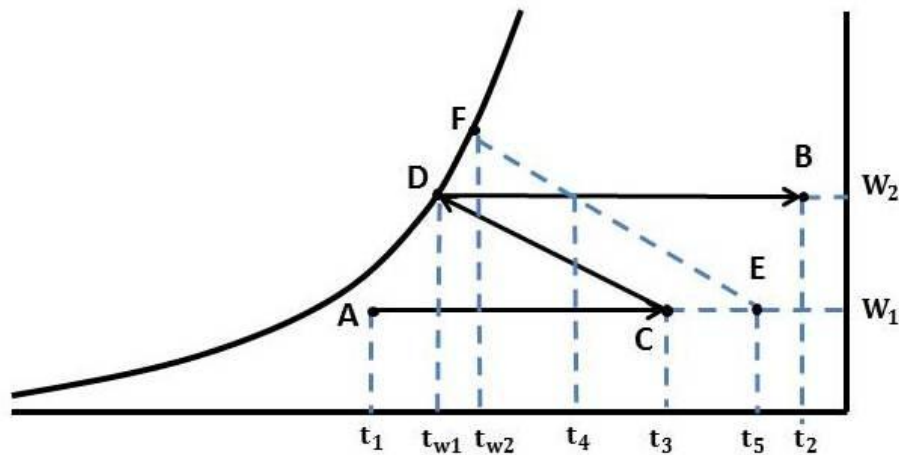


Fig.27. Proceso de humidificación adiabática.

Si disponemos de una masa gaseosa en las condiciones A y se desea llevarlo hasta las condiciones de D, de acuerdo a la figura, el proceso se realiza de la siguiente manera:

- 1) Se realiza un calentamiento del aire fuera del contacto del agua (tramo AC) hasta la temperatura de saturación adiabática t_3 correspondiente a la temperatura de rocío del aire en las condiciones B
- 2) El aire caliente se introduce en el humidificador adiabático, en donde alcanza las condiciones de saturación al ponerse en contacto con el líquido, el cual se encuentra a una temperatura igual a la de saturación del aire. Una porción del líquido se transfiere al aire, saliendo el resto por la parte inferior del humidificador a la temperatura de bulbo húmedo del aire; para asegurar la recirculación constante del líquido, éste se bombea hacia los rociadores, siempre a la temperatura húmeda del aire. La relación entre la temperatura del aire y su humedad a lo largo del humidificador viene dada por la ecuación (33)
- 3) El aire que sale por la parte alta del humidificador que tiene la humedad deseada W_2 en el punto D, se calienta fuera del contacto con el líquido (segmento CD) hasta la temperatura final t_2



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Sin embargo en la mayoría de los casos no se alcanza la saturación completa a la salida del humidificador pero sale a la humedad W_1 (punto E). La temperatura a la salida t_4 a la t_{bh2} es más grande que la temperatura de rocío correspondiente al estado D. Para que al aire salda del humidificador en el punto E, deberá entrar en el mismo a una temperatura t_s (punto F) un poco superior a t_3 pero con una temperatura de bulbo húmedo igual que F.

Para desarrollar el proceso de E a D, sólo se le aplica el calor necesario, fuera del contacto del líquido, a la salida por la parte alta del humidificador.

Si la temperatura del líquido no corresponde a la de bulbo húmedo de la masa gaseosa, la relación entre la temperatura del aire y su humedad es este humidificador está dada por:

$$t = \frac{W_s - W \cdot \lambda_L + C t_s - t_{in}}{C} + t_s \quad (49)$$

En donde λ_L , es el calor de vaporización del líquido a la temperatura de entrada en el humidificador, t_s la temperatura de saturación del aire y t_{in} la del líquido a la entrada.

Si t_s es cercana a t_{in} , el valor del calor sensible $\lambda_L + C t_s - t_{in}$ es muy pequeño comparando con el calor latente y la ecuación (49) se simplifica y se convierte en:

$$W_s - W = \frac{C_H}{\lambda_s} \cdot t - t_s \quad (50)$$

Las relaciones anteriores son aplicables para el secado de sólidos, bajo las consideraciones de una operación adiabática y que el material por secar entra y sale del secador a la temperatura de saturación adiabática. Este proceso no es completamente isoentálpico, aunque la desviación es pequeña. Si se desarrolla un balance de energía en un humidificador adiabático tenemos que:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$H_{in} = H_{out} + W_2 - W_1 \cdot h \quad (51)$$

En donde H_{in} y H_{out} son las entalpías de entrada y salida y h las del líquido a la temperatura de entrada.

La disminución de entalpía es:

$$H_{in} - H_{out} = W_2 - W_1 \cdot h \quad (52)$$

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002).



5. MÉTODOS DE DESHUMIDIFICACIÓN

La deshumidificación se lleva a cabo enfriando la masa de aire hasta una temperatura con la cual la humedad de saturación sea la correcta.

El aire puede deshumidificarse por medio de sistemas de enfriamiento mecánico o mediante el uso de materiales sólidos o líquidos, que por mecanismos de adsorción

y absorción, pueden fijar cantidades específicas de vapores, éstos materiales reciben el nombre de desecantes.

El enfriamiento puede efectuarse mediante dos procesos que son: por contacto indirecto o directo.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002)

5.1 Contacto Indirecto.

Si una masa de aire húmedo se pone en una superficie, de preferencia metálica que se mantiene a una temperatura inferior a la de rocío del aire, ésta se enfriará paulatinamente hasta alcanzar las condiciones de saturación, si se sigue con las condiciones en un momento dado el vapor de agua se condensará sobre la superficie fría, quedando la masa gaseosa saturada.

Si se va retirando continuamente el líquido, con el objeto de mantener la superficie seca, la temperatura hasta la que ha de enfriarse la masa de aire será la temperatura de rocío para la cual la humedad final sea la deseada.

En la figura 28 se observa que el punto A corresponde a las condiciones iniciales de la masa de aire y el punto C a las condiciones que deseamos, la interpretación es la siguiente: desde A a B existe un enfriamiento de la masa de aire hasta las condiciones

de saturación; después de B a C hay un enfriamiento y condensación del vapor de agua a lo largo de la curva de saturación.

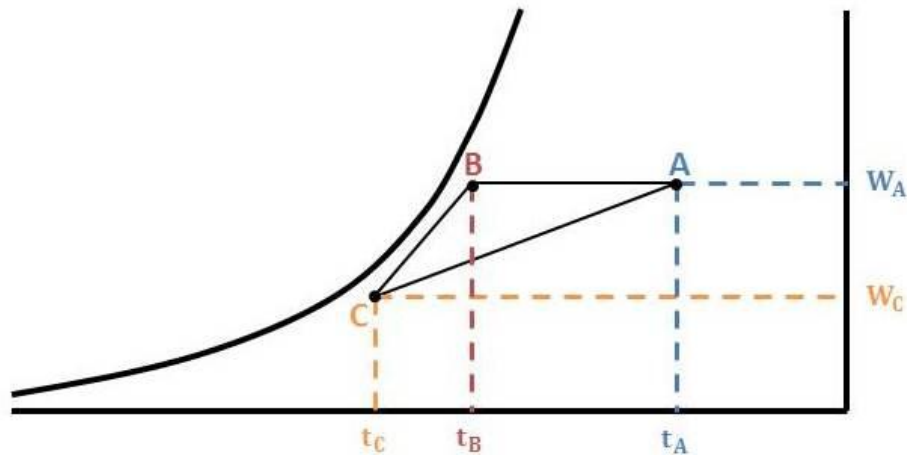


Fig.28. Proceso de deshumidificación por contacto indirecto.

En la práctica, el proceso es continuo y es difícil mantener la superficie seca, por lo tanto se debe considerar el contacto de la masa gaseosa con el líquido. Dado que el agua alcanza rápidamente una temperatura muy próxima a la de la superficie metálica, habrá un gradiente de temperatura desde la masa global del aire hasta la superficie del agua condensada, existiendo también un gradiente de humedad en la misma dirección.

Esto modifica el trayecto ABC, y el proceso real es más parecido al trayecto AC, siempre y cuando la temperatura de la superficie permanezca constante. La ecuación de la recta AC es la siguiente:

$$\frac{t_A - t_C}{t - t_C} = \frac{W_A - W_C}{W - W_C} \quad (53)$$

Como la entalpía en el punto C es menor que la entalpía del aire, se establece un flujo de calor de la masa gaseosa hacia la superficie y para mantener la temperatura



UNIVERSIDAD DE CUENCA

constante se necesita un enfriamiento. Atendiendo al mecanismo de la transmisión del calor, la cantidad total del calor perdido por el aire será:

$$q = A \cdot \frac{h}{C} \cdot H - H_C \quad (54)$$

Y la cantidad de calor que se transfiere desde la superficie fría de condensación hasta el refrigerante a la temperatura T_R es:

$$q = U \cdot A' \cdot t_C - t_R \quad (55)$$

Realizando un balance tenemos la siguiente expresión:

$$\frac{t - t_R}{H - H_C} = \frac{h \cdot A}{c \cdot U \cdot A'} \quad (56)$$

En donde las áreas de contacto A y A' corresponden al contacto aire-agua y agua-metal.

Como se puede apreciar la recta AC es oblicua si la temperatura de la superficie t_s es menor que la de rocío del aire, ya que si t_s y t_R son iguales, la recta sería horizontal y no habrá condensación.

5.2 Contacto directo con agua fría.

Si en una torre de deshumidificación se pone en contacto aire húmedo en contacto con un líquido a una temperatura inferior a la de rocío del aire, el aire se enfría perdiendo calor sensible y calor latente, mientras que el agua eleva su temperatura.

Las condiciones límites se alcanza cuando el aire se satura a la temperatura del agua, considerando que el rendimiento de la torre de deshumidificación es del 100%.

La interpretación sobre el diagrama psicrométrico es la siguiente: si disponemos de aire en las condiciones A y el agua está a la temperatura t_E , esta se calentará hasta t_C y el aire alcanzará las condiciones del punto D (saturación a T_D).

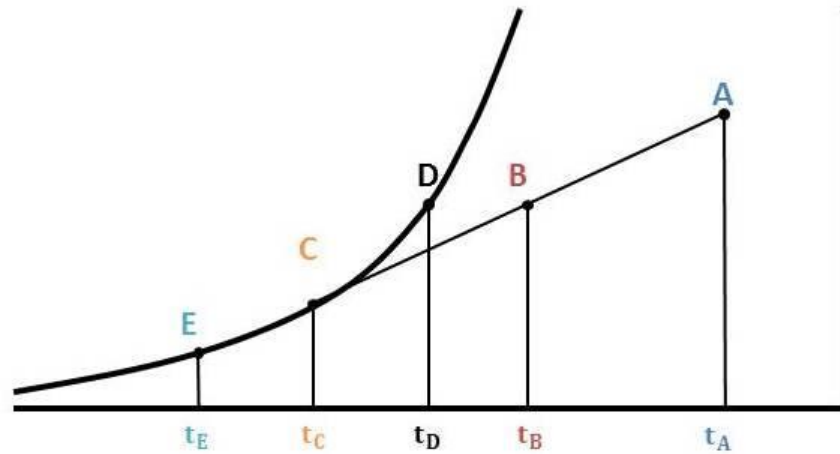


Fig.29. Proceso de deshumidificación por contacto directo

Si no se considera el calor sensible del agua condensada, y se desarrolla un balance de energía se tiene la siguiente expresión:

$$G \cdot H_A - H_C = L_C \cdot t_D - t_A \quad (57)$$

En la práctica, el aire no alcanza las condiciones de saturación indicadas por el punto D sino que sale a una temperatura superior t_B , mientras que el agua sale a la temperatura t_C sin logran condiciones de equilibrio.

La eficiencia de un deshumidificador de este tipo, se representa por:

$$EF = \frac{H_A - H_B}{H_A - H_D} \cdot 100 \quad (58)$$

Y su valor puede variar por el caso de la mezcla aire-agua entre 55 y 99%.

5.3 Enfriamiento del agua por evaporación.

El enfriamiento del agua la cual ha sido empleada en procesos como el de refrigeración que se realiza con el fin de llevar el agua a su temperatura original para que pueda entrar nuevamente a prestar servicio en el proceso fabril.

Este enfriamiento se lleva a cabo poniéndola en íntimo contacto con una corriente de aire cuya temperatura húmeda sea inferior a la del agua. En estas condiciones el agua se enfría por evaporación, y también por transmisión de calor sensible al aire si la temperatura es inferior.

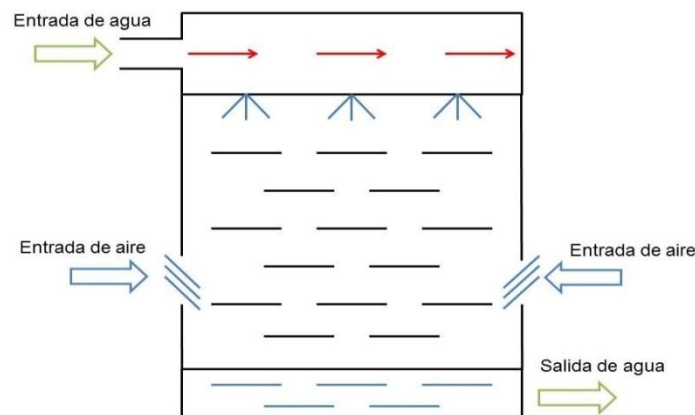


Fig.30. Torre de enfriamiento tipo natural.

A medida que asciende la temperatura del aire aumenta su humedad y descende la temperatura del agua. La temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura húmeda del aire correspondiente a las condiciones de entrada a la torre por la parte inferior de la misma, ya que el contacto se efectúa en contracorriente.

Una pequeña fracción del agua se evapora, cifrándose la evaporación en un 2% del agua de entrada por cada 10°C de enfriamiento de la misma.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

(Ocón Tojo, 1976)

5.4 Deshumidificación por medio de sustancias químicas.

Este proceso de deshumidificación utiliza materiales líquidos y sólidos, llamados desecantes que tienen como función extraer el vapor del líquido del aire húmedo.

En el caso de líquidos es el proceso conocido como absorción y en el caso de los sólidos se llama adsorción.

Los desecantes sólidos en la mayoría de los casos son adsorbentes del tipo de la silica-gel, carbón activado, zeolitas naturales y sintéticas, y en el caso de los líquidos de glicoles o soluciones acuosas de cloruro de litio, cloruro de calcio, ácido sulfúrico, etc.

En el caso de algunos sólidos con el objeto de tener un proceso continuo, se diseña una rueda o una torre empacada o un encapsulado con material desecante sólido. En donde al girar para la corriente de aire, del cual adsorbe la humedad y posteriormente por una corriente caliente, que seca el sólido regenerándose.

En el caso de los desecantes líquidos, este proceso consiste en rociar con una solución que contiene un desecante adsorbente de vapor del líquido, un serpentín refrigerante colocado en la corriente del aire a tratar, con lo cual se adsorbe la humedad. Parte de la solución se bombea continuamente hacia el regenerador en el que también por rociado sobre el serpentín de calentamiento, cede humedad a una corriente de aire que lo transporte al exterior.

(Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, 2002).



6 SIMULACIÓN DE PROCESOS

6.1 Introducción.

El modelaje del comportamiento de un proceso químico, físico o físico-químico mediante el uso de un programa de computación se denomina "simulación de procesos". Estos programas nos permiten obtener una o más variables dependientes al

ingresar dos o más variables independientes, adicionalmente pueden posibilitarse la generación de soluciones gráficas.

Planificar un proceso de simulación requiere de los siguientes pasos:

- Formulación del problema.
- Recolección y procesamiento de la información requerida.
- Formulación del modelo matemático.
- Evaluación de las características de la información procesada.
- Formulación de un programa de computadora.
- Validación del programa de computadora.
- Diseño de experimentos de simulación.
- Análisis de resultados y validación de la simulación.

(Robert E. Shannon, 2010)

6.2 Importancia de la simulación en la Ingeniería.

Los recientes avances en la simulación y la variada disponibilidad de software que se dispone en el mercado, han hecho que la técnica de simulación sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Con la simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una detenida observación del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y como consecuencia sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La simulación de sistemas complejos ayudará a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en el sistema y a comprender mejor las interrelaciones entre estas variables.

6.3 Aplicaciones de la Simulación

Las áreas de aplicación de la simulación son muy amplias, numerosas y diversas, como: Análisis del impacto ambiental causado por diversas fuentes Análisis y diseño de sistemas de manufactura, Análisis y diseño de sistemas de comunicaciones. Análisis de sistemas de transporte terrestre, marítimo o por aire. Análisis de grandes equipos de cómputo. Análisis de un departamento dentro de una fábrica. Análisis de sistemas de acondicionamiento de aire. Planeación para la producción de bienes. Análisis financiero de sistemas económicos.

Es recomendable la aplicación de la simulación a sistemas ya existentes cuando existe un problema de operación o para mejorar el comportamiento. El efecto que sobre el sistema ocurre cuando se cambia alguno de sus componentes se puede examinar antes de que ocurra el cambio físico en la planta para asegurar que el problema de operación se soluciona o bien para determinar el medio más económico para lograr la mejora deseada.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Todos los modelos de simulación se llaman modelos de entrada-salida. Es decir, producen la salida del sistema si se les da la entrada a sus subsistemas interactuantes. Por tanto los modelos de simulación se “corren” en vez de “resolverse”, a fin de obtener la información o los resultados deseados. Son incapaces de generar una solución por sí mismos en el sentido de los modelos analíticos; solos pueden servir como herramienta para el análisis del comportamiento de un sistema en condiciones especificadas por el experimentador. Por tanto la simulación no es una teoría, sino una metodología de resolución de problemas. Además la simulación es solo uno de varios planteamientos valiosos para resolver problemas que están disponibles para el análisis de sistemas.

(Gordon G, 2010)

6.4 Reseña de Java

Originalmente, Java fue llamado “Oak”. Sus inicios fueron desde 1991 cuando James Gosling encabezó un proyecto cuyo objetivo original era la implementación de una máquina virtual portable y un lenguaje de programación, ambos orientados a dispositivos “embedded” (procesadores incorporados en diversos dispositivos de consumo masivo). En un principio el lenguaje obtuvo las características de C y C++.

Con el avance del internet, pareció natural aprovechar este lenguaje para desarrollar las diversas aplicaciones distribuidas y portables. En el año de 1995 llega la primera implementación y los navegadores “navegadores web” incorporaron soporte Java para la ejecución de pequeñas aplicaciones interactivas, llamados Applets.

Por lo tanto, Java hace referencia a un conjunto de referencias de tecnologías entre las cuales el lenguaje Java es sólo una de ellas.

Sun¹ controla los estándares de Java a través de un mecanismo de apertura parcial denominado Java Community (JCP.)

¹ SUN Microsystems fue una empresa informática que se dedicaba a vender componentes informáticos, software. Fue adquirida en el año 2009 por Oracle Corporation



UNIVERSIDAD DE CUENCA

(The history of Java. Obtenida el 29 de Noviembre del 2012 en <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/overview/javahistory>)

6.5 Ventajas y desventajas de Java

Es orientado a objetos: Por lo tanto es beneficioso tanto para el proveedor de las bibliotecas de clases como para el programador de las diversas aplicaciones.

- Confiable: Java minimiza los errores que se escapan a la fase de prueba.
- Robusto: Los diversos errores se detectan inmediatamente al producirse, lo que facilita la operación de la depuración.
- Seguro: Los diversos Applets recuperados por medio de la red no pueden causar daño a los usuarios.
- Puede integrar componentes de Internet y bases de datos remotas.
- Crear componentes de software y reusar software. Los programas de java consiste de piezas llamadas clases.
- El uso de java no se limita a manejo de animaciones, audio o video.
- Java soporta aplicaciones que serían ejecutadas en varios entornos de red, desde Linux, Windows Nt, Mac y estaciones de trabajo. Para realizar esta ejecución, el compilador de Java genera un bytecodes que es un formato para transportar el código eficientemente a múltiples plataformas.
- Java es portable: Los mismos binarios funcionan correctamente en Windows/95 y /NT 2000, XP, Unix/Motif y Power/Mac. Esto es lo más importante poder correr sin ninguna modificación en una variedad de plataformas.

Tiene pocas desventajas. Entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- La ejecución de JVM de las aplicaciones sea muy lenta.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Otra desventaja se puede mencionar que Java es considerado un lenguaje difícil de aprender debido a su compleja sintaxis pero su estructura es completa y organizada y Java no debería ser considerado como lenguaje difícil de aprender.

(Instituto Tecnológico de Hermosillo. Java. Obtenido el 30 de Noviembre del 2012 en <http://eddi.ith.mx/Curso/programa.htm>)

6.6 Java vs otros lenguajes de programación.

Visual Basic.

El punto fuerte de Visual Basic es en Microsoft. Permite realiza de una manera rápida una aplicación basada en ventanas que se puede integrar de una manera sencilla con otros componentes como Acces, Word, Excel etc. Y por lo tanto el

problema de Visual Basic es que funciona únicamente con plataformas Windows. Java en cambio tiene una orientación multiplataforma desde sus inicios.

C#

El lenguaje de programación de C# tiene como desventaja que para ser usado tiene que conseguirse una versión reciente de Visual Studio .NET, además tiene que tener algunos requerimientos del sistema tales como contar con Windows NT4, tener un espacio de 4gigas para la instalación, entre otros.

6.7 Funcionamiento de Java.

El fichero de código fuente es escrito mediante un editor suministrado con el paquete del lenguaje Java. Al crear el fichero *.java*, se compila y se genera un fichero intermedio con los bytecodes de extensión *.class*

Al generarse este fichero, ya puede ser interpretado en cualquier máquina virtual de Java. Este funcionamiento se puede ver esquemáticamente en la siguiente figura.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

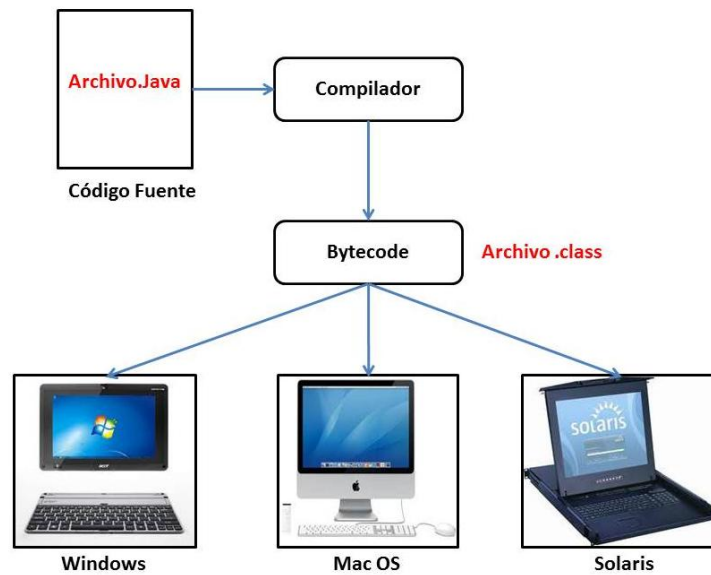


Fig. 31 Compilación y ejecución de programas en Java.

6.8 Instalación de Java en los diferentes Sistemas Operativos.

(Ver instalación en el Anexo B)

6.9 Entorno de desarrollo integrado (IDE).

Un IDE es un entorno de desarrollo integrado que es una aplicación que ayuda al desarrollo del software. Algunas características son las siguientes:

- Tienen un entorno gráfico.
- Depurador.
- Compilador.
- Son multiplataformas.
- Tienen editor de texto.
- Ejecutor.

Algunos IDEs generan proyectos (Eclipse, Netbeans, Bluej).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Algunos IDES de Java son:

- JRE ("Java Runtime Environment"). Es utilizado únicamente para ejecutar ("Runtime") programas en Java, que se da en empresas que diseñan interfaces gráficas o aplicaciones en Java para su producto.
- JDK, SDK, J2SE. "Java Development Kit"(JDK),"Standard Development Kit" (SDK) y "Java 2 Standard Edition" (J2SE). Estos son nombres para un mismo componente la cual incluye el API de Java que es un conjunto de clases utilizado para la generación de otros programas básicos, además incluye el JRE (JVM) y un compilador, éste compilador produce el byte-code o class files la cual es interpretado por el JRE.
- NetBeans es una plataforma con una base modular y extensible que se utiliza para crear aplicaciones de escritorio grandes. Diferentes empresas asociadas al desarrollo de software, proporcionan diversas extensiones las cuales se integran en la plataforma y que además se pueden utilizarse para desarrollar sus propias herramientas y soluciones.

Las características de la plataforma son:

- Administra las interfaces de usuario como son menús y barras de herramientas.
- Administra las configuraciones del usuario.
- Administra el almacenamiento.
- Administra las ventanas.

(Java y sus funcionalidades. Obtenida el 29 de Noviembre del 2012 en <http://www.osmosislatina.com/java/>)

6.10 Aplicaciones de Java.

La plataforma Java tiene alrededor de 6.5 millones de desarrolladores de software. Java está presente en un gran número de empresas, industrias, dispositivos,



UNIVERSIDAD DE CUENCA

equipos y redes. Por lo tanto se puede decir que Java está en todas partes debido a su versatilidad y eficiencia, portabilidad de su plataforma y seguridad que ofrece.

Alrededor de 4.5 millones de dispositivos utilizan Java como:

- En más de 800 millones de equipos.
- 2.100 millones de teléfonos móviles y otros dispositivos de mano.
- 3.500 millones de tarjetas inteligentes.
- Sintonizadores, impresoras, cámaras web, juegos, sistemas de navegación para automóviles, terminales de lotería, dispositivos médicos, cajeros de pago en aparcamientos, etc.

En nuestro caso de estudio se procede a utilizar el Java 7, que es la versión más reciente de Java la cual incluye características nuevas, mejoras y correcciones de bugs para una mejor eficacia en el desarrollo y la ejecución del programa mismo.

Entre las nuevas características de java 7 se menciona las siguientes:

- Mejor rendimiento, estabilidad y seguridad.
- Mejoras en el plugin de Java para un buen desarrollo y el despliegue de aplicaciones de contenido enriquecido de internet.
- Mejoras en el lenguaje de programación Java que de una manera facilitan a los desarrolladores la escritura y optimización del código Java.
- Mejoras en Java Virtual Machine para soportar lenguajes que no son Java.

(Conozca más sobre la tecnología Java. Obtenida el 29 de Noviembre de 2012 en <http://javaxyz.wikispaces.com/>)

El sistema operativo a utilizar para el desarrollo del software del diagrama psicométrico va a ser Ubuntu y las pruebas respectivas en Windows para determinar el correcto funcionamiento del programa.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Ubuntu utiliza un núcleo Linux y su origen está orientado al usuario novel y promedio, con enfoque en la facilidad de uso y mejorar la experiencia del usuario. Ubuntu está compuesto de múltiple software distribuido bajo una licencia libre.

Su patrocinador es Canonical que es una compañía británica la cual ofrece el sistema de manera gratuita y que se financia por medios de servicios vinculados al sistema operativo y vendiendo soporte técnico y además Canonical ofrece una versión orientada a proveedores, una versión para empresas, una para televisores y una para usar el escritorio desde smartphones.

Ubuntu soporta dos arquitecturas de hardware en computadoras personales y servidores: la de 32 y 64 bit. También es capaz de actualizar a la vez todas las aplicaciones instaladas en la máquina.

Ubuntu posee una gran cantidad de aplicaciones para las tareas cotidianas, entretenimiento, desarrollo y aplicaciones para la configuración de todo el sistema.

Además Ubuntu es conocido por su facilidad de uso y aplicaciones orientadas al usuario final, el centro de software de Ubuntu permite instalar miles de aplicaciones disponibles.

Al hablar de seguridad, el sistema incluye funciones avanzadas y entre sus políticas se encuentra en la de no activar, de forma predeterminada, procesos latentes al momento de instalarse y por lo tanto no existen contrafuegos predeterminado ya que no existen servicios que puedan atentar a la seguridad del sistema. Posee accesibilidad e internacionalización, ya que el sistema está disponible para tanta gente como sea posible. Como requisitos para la instalación de Ubuntu son los siguientes:

- Procesador X86 a 1 GHz.
- Memoria RAM de 512 MB.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Disco Duro de 15 GB.
- Tarjeta gráfica y monitor con un soporte de resolución de 800x600.
- Lector de CD-ROM.

7. MANUAL DE OPERACIÓN.

Una vez revisado todas las ecuaciones básicas para el cálculo de las diferentes propiedades psicrométricas, procedemos a diseñar el programa para que el usuario especifique la presión atmosférica y los intervalos de temperatura que se deseen calcular. A continuación damos a conocer sobre el Manejo del programa para su correcto funcionamiento

7.1 Características generales del programa.

El programa desarrollado en la plataforma Java permite al usuario desarrollar los cálculos que habitualmente se realizan de forma manual sobre cualquier diagrama convencional. En este programa se pueden obtener las propiedades psicrométricas de cualquier estado de aire, además como los procesos más frecuentes de las instalaciones de climatización ofreciendo un amplio rango de temperaturas a diferentes presiones atmosféricas.

A continuación se hará una exposición de las posibilidades que ofrece el programa, al mismo tiempo que se muestra como se utiliza.

Funciones que realiza

Las principales características del software con:

- Obtención de las propiedades psicrométricas de cualquier estado del aire húmedo
- Cálculo de los procesos más frecuentes en instalaciones de climatización (calentamiento y enfriamiento sensible, mezcla de dos gases a diferentes condiciones, calentamiento y enfriamiento adiabático, enfriamiento adiabático)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Zona de confort.

7.2 Ejecución del programa.

Cuando se ejecuta el programa, lo primero que se ve es la pantalla principal en la cual se tiene.

- Una zona de elección de ciudades del Ecuador, en donde se elige una ciudad y automáticamente da como resultado la presión atmosférica en atmosferas y la temperatura de ebullición.
- Para generar el diagrama psicrométrico escogemos: Grafico - normal y damos clic en calcular.
- También nos da como opción introducir como dato la presión atmosférica y damos clic en opción de calcular para que nos dé el resultado de la temperatura de ebullición y además que nos genere el grafico.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

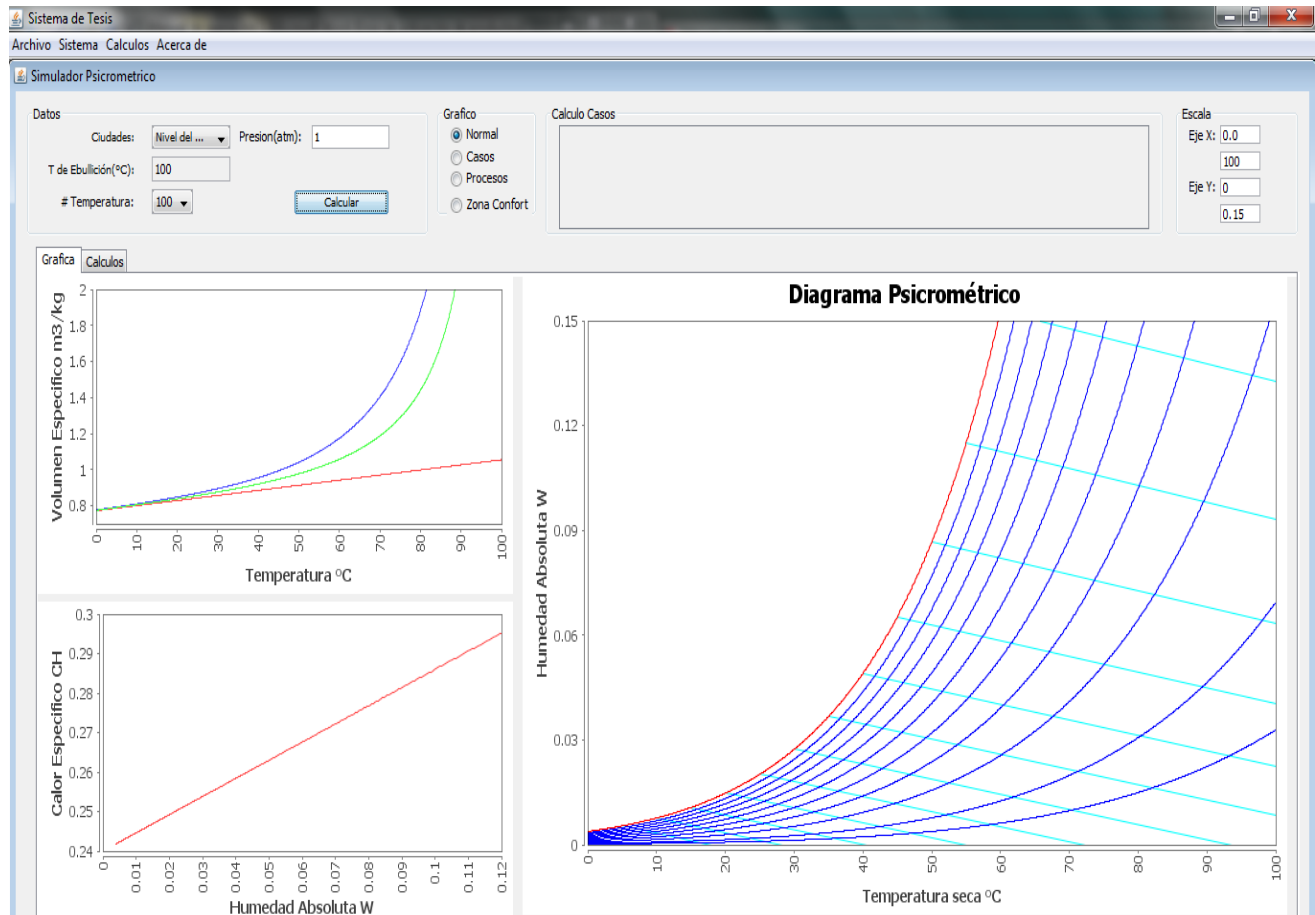


Fig.36. Pantalla principal del programa

- En el diagrama se distingue 3 gráficas: temperatura-humedad absoluta, temperatura-volumen específico, humedad absoluta y calor específico.
- En la parte superior derecha se encuentra opciones para modificar la escala del gráfico principal, si se desea cambiar las escalas o algunos aspectos de cualquiera de los 3 gráficos solo se da clic izquierdo en cualquier gráfico y elegir la opción propiedades en donde nos muestra una ventana con varias opciones para modificar el grafico de acuerdo a la necesidad del usuario.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

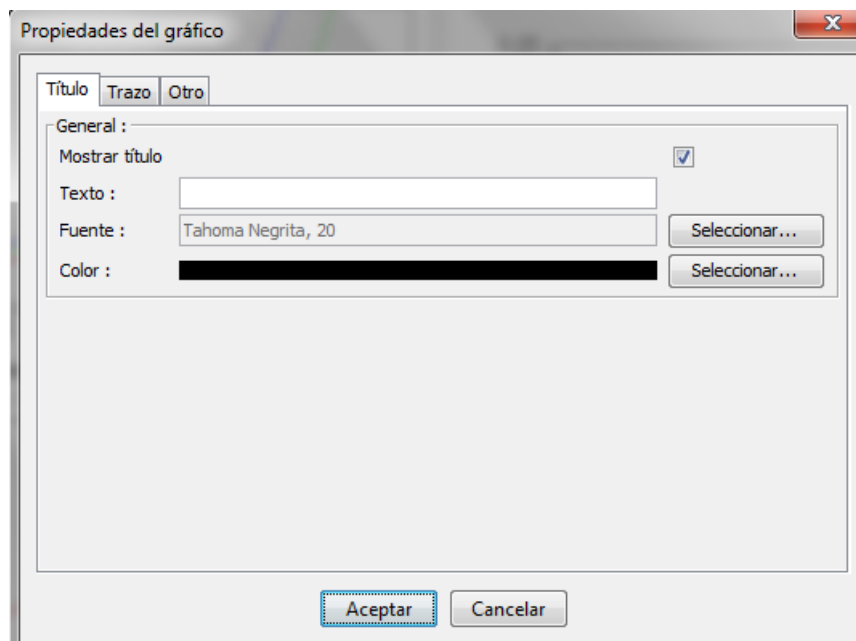


Fig.37. Propiedades del gráfico. Título

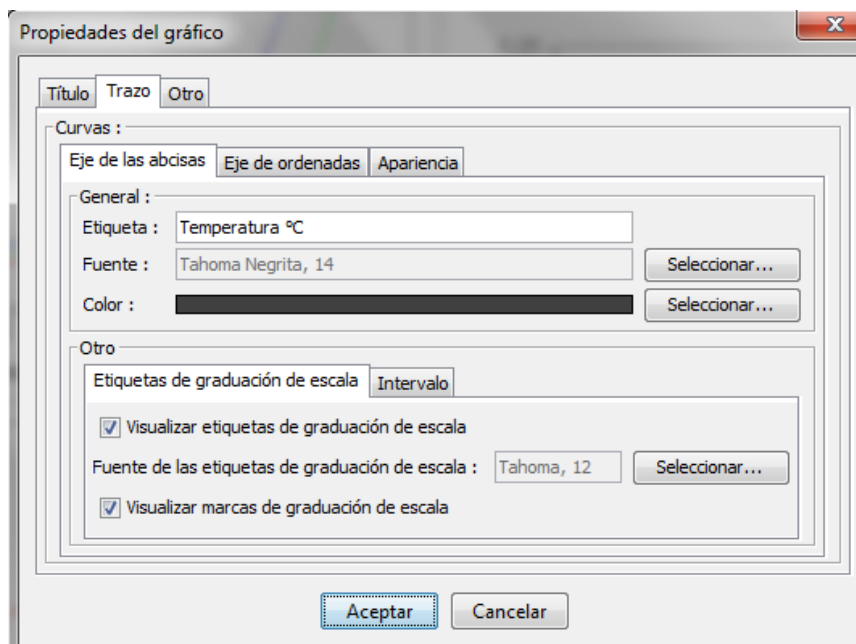


Fig.38. Propiedades del gráfico. Trazo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

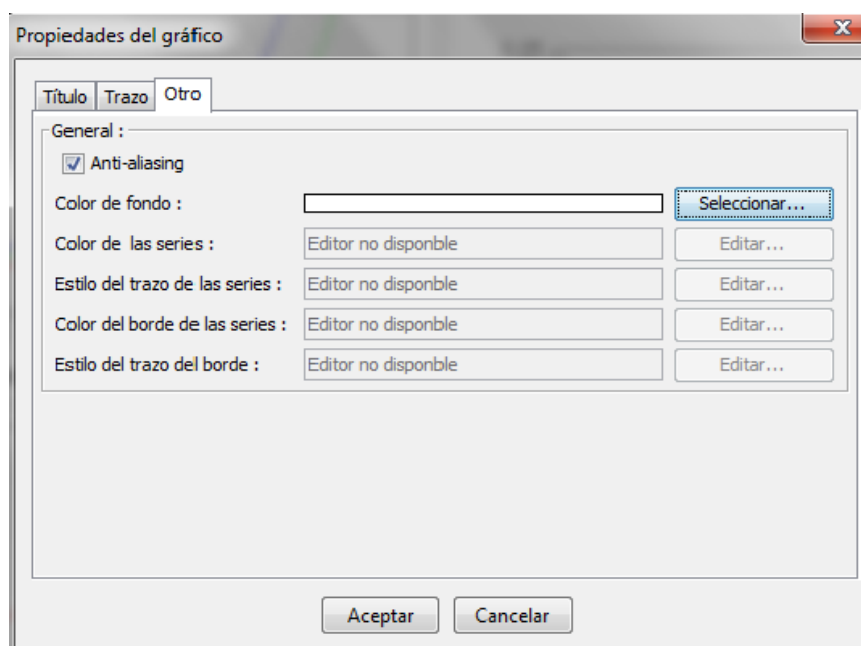


Fig.39. Propiedades del gráfico. Otro

En la barra de herramientas se muestra el menú de cálculos en donde se abre una ventana con las opciones de:

- Cálculo de casos.
- Cálculos de procesos.
- Zona de confort.

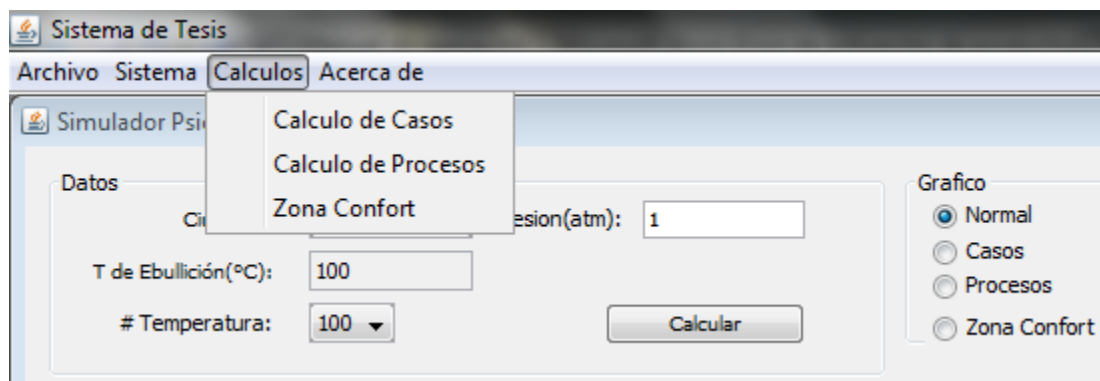


Fig.40. Cálculos psicrométricos



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Ingreso de puntos. Para genera un punto sobre la gráfica se realiza de la siguiente manera:

- Se elige la ciudad de estudio o se coloca directamente la presión atmosférica como se indicó anteriormente y damos clic en calcular para generar el grafico base.

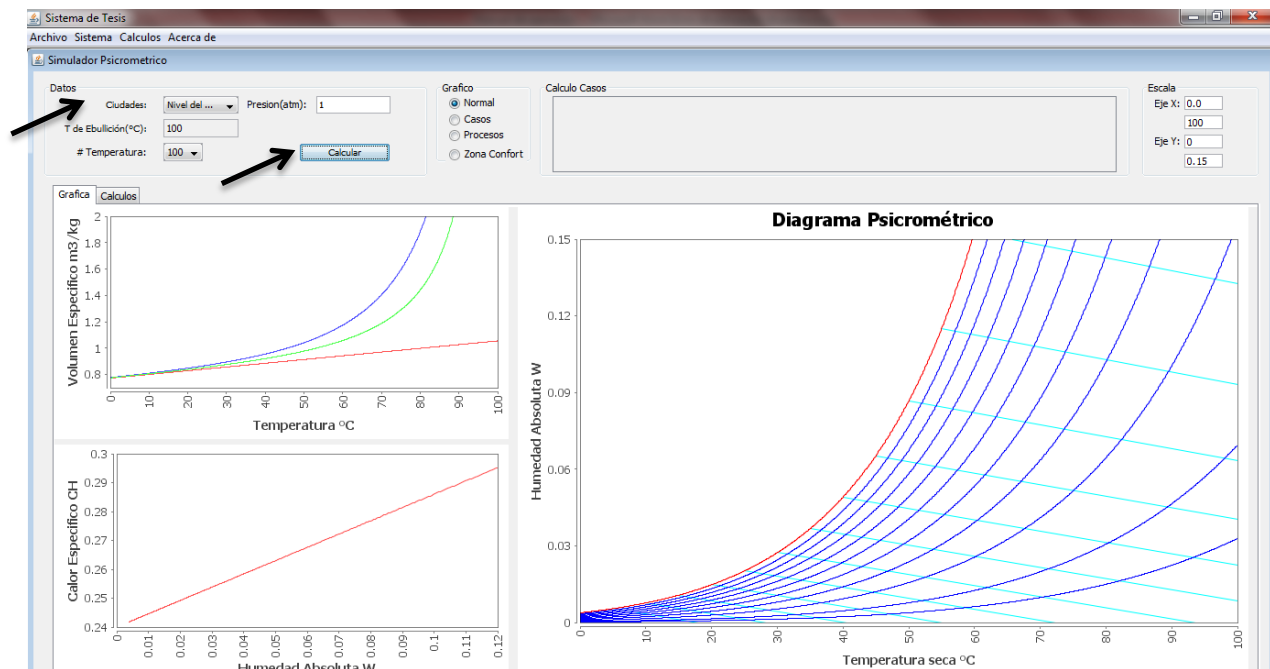


Fig.41. Ingreso de puntos

- A continuación en la barra de menú, damos clic en: Cálculos – Cálculos de casos y nos aparece una ventana con las 9 combinaciones que se tiene para el estudio de las propiedades del aire húmedo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Calculo de Casos

Casos

- ☒ t - HR
- ☐ t - W
- ☐ t - tbh
- ☐ t - tr
- ☐ W - RH
- ☐ W - tbh
- ☐ HR - tbh
- ☐ HR - tr
- ☐ tbh - td

Datos

Punto 1

Temperatura

00,00 Min 300 C Max

Humedad Relativa

0 % Min 100 % Max

Aceptar Cancelar

Fig.42. Calculo de casos.

- Elegimos una de las 9 opciones y llenamos los datos ingresos que nos aparece y damos en la opción "Aceptar."

Calculo de Casos

Casos

- ☐ t - HR
- ☒ t - W
- ☐ t - tbh
- ☐ t - tr
- ☐ W - RH
- ☐ W - tbh
- ☐ HR - tbh
- ☐ HR - tr
- ☐ tbh - td

Datos

Punto 1

Temperatura

0 °C Min 300 °C Min

Humedad Absoluta

0 Min 1 Max

Aceptar Cancelar

Fig.43. Opciones del cálculo de casos.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Y para finalizar damos clic en calcular y señalamos la opción de Gráfica en "Casos"

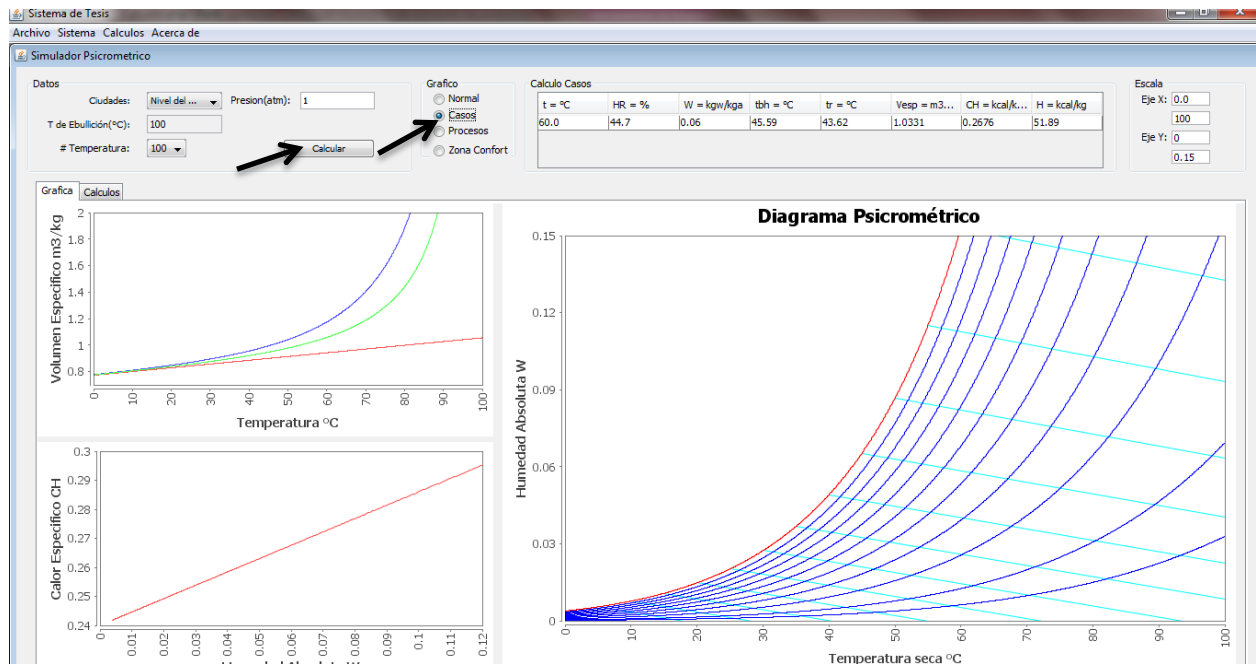


Fig.44. Diagrama de cálculo de casos.

- A continuación nos genera el grafico final y en la parte superior nos indica las propiedades psicrométricas calculadas.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

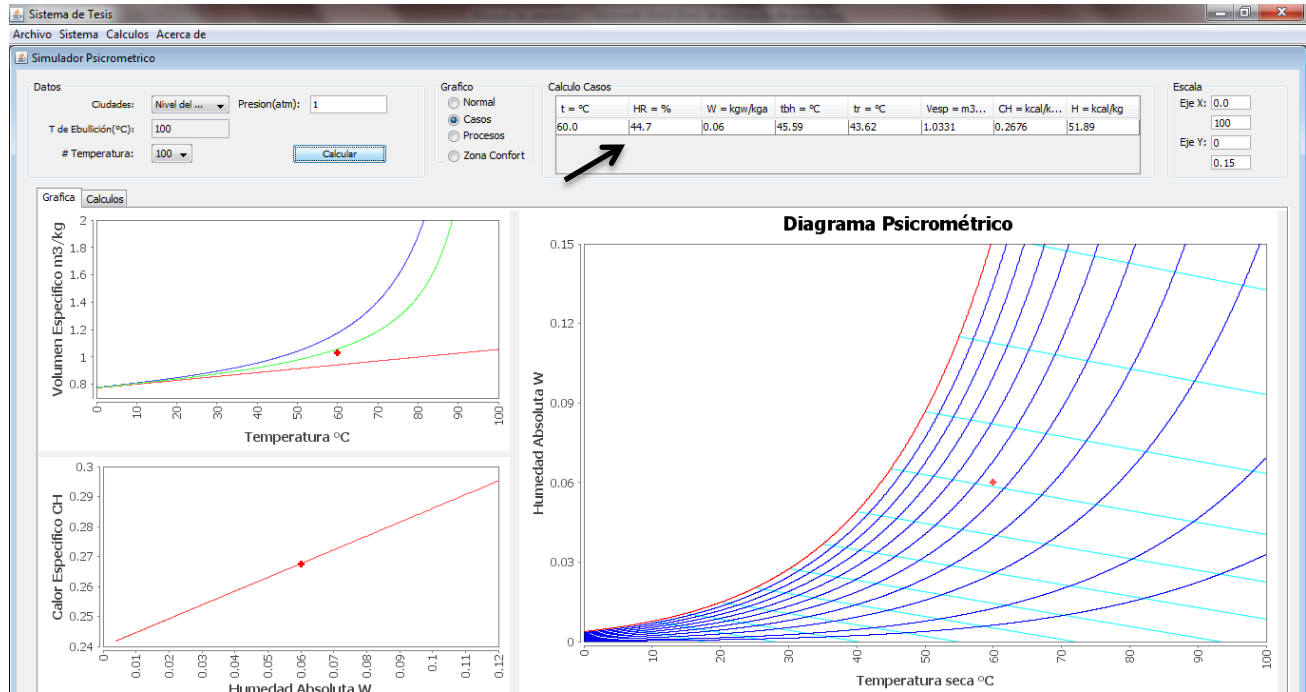


Fig.45. Propiedades calculadas.

- Así como se realizó el cálculo de las propiedades del aire húmedo, lo mismo se realiza para el cálculo de los procesos psicrométricos.
- Se elige el grafico base.
- En la barra de menú damos clic en: Cálculos-Cálculos de procesos
- Nos da una ventana de los diferentes procesos que se mencionó anteriormente y elegimos una de las 4 opciones y llenamos los datos de entrada.

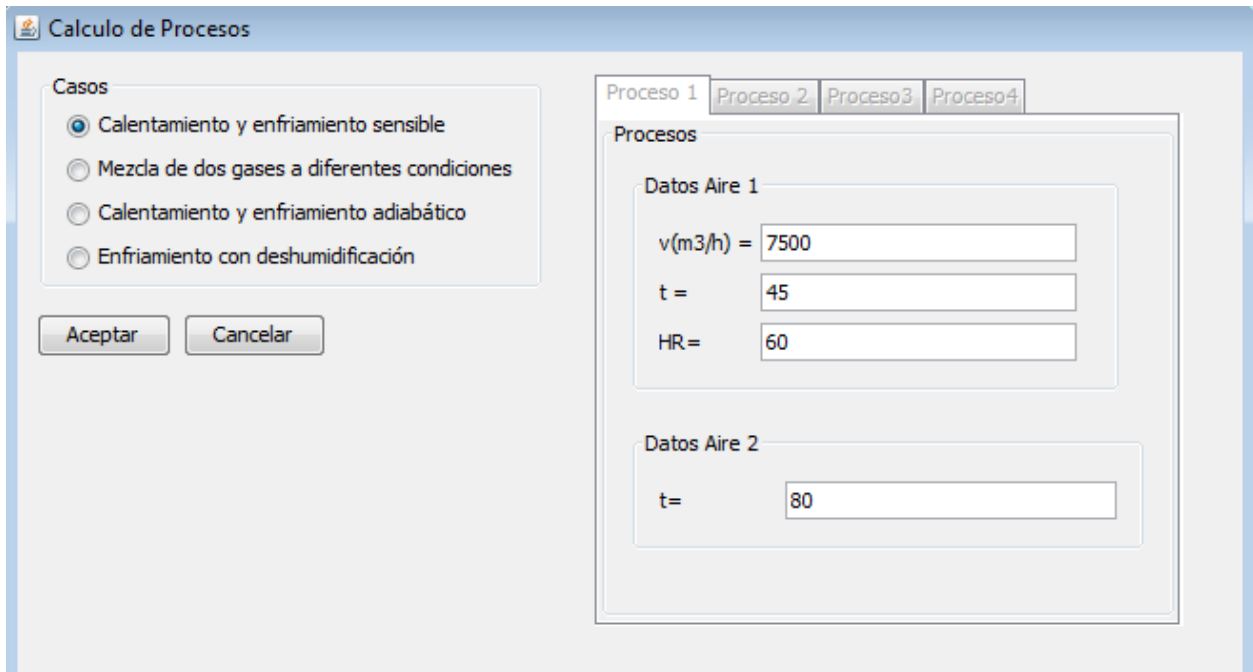


Fig.46. Calculo de procesos

- Damos clic en Aceptar, se genera el grafico, luego marcamos la opción de Gráfico en "Proceso" y calculamos.

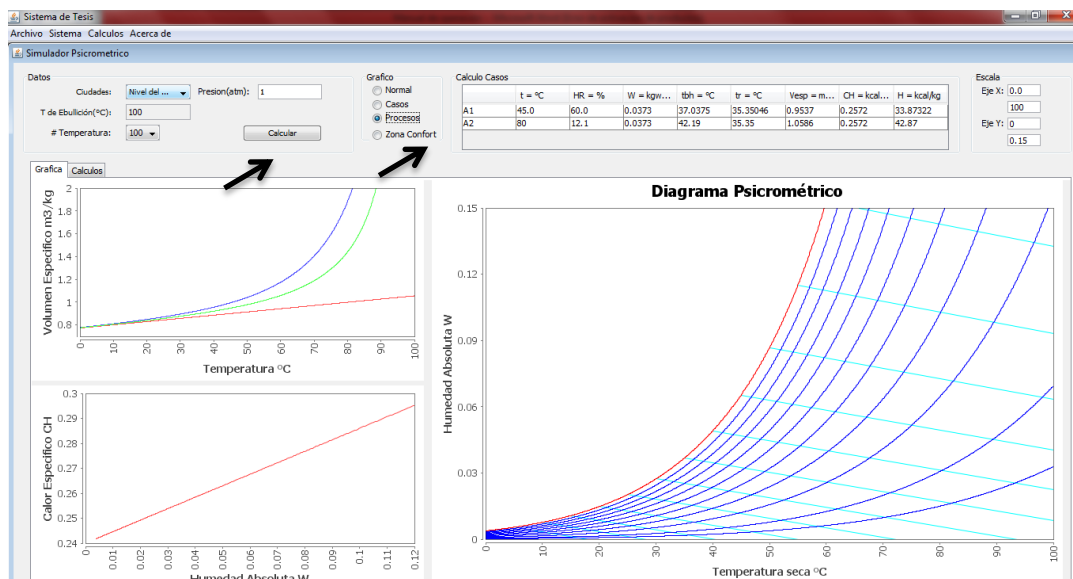


Fig.47. Diagrama de cálculo de procesos.

- Y nos da la gráfica final del proceso con un gráfico adicional

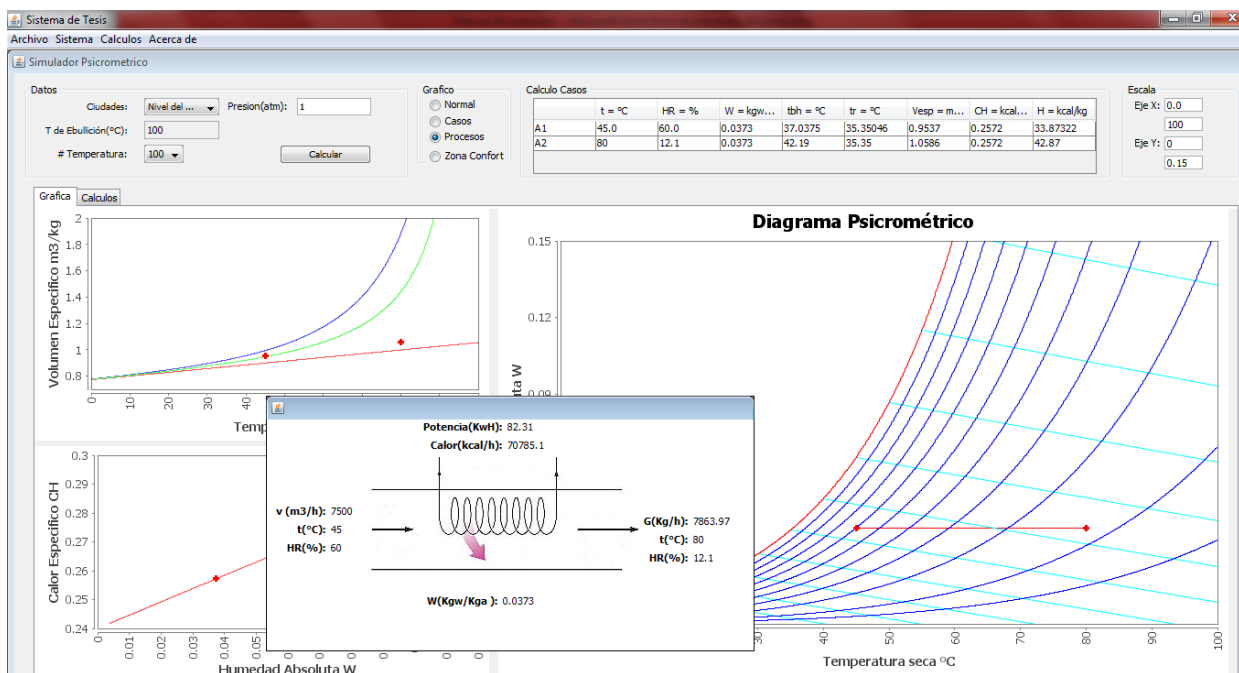


Fig.48. Gráficos adicionales de procesos.

- Para el cálculo de la Zona de Confort se realiza el mismo procedimiento indicado anteriormente. Por lo general la zona de confort está entre un rango de temperaturas de 21 a 29°C y una humedad relativa de 30% a 70%

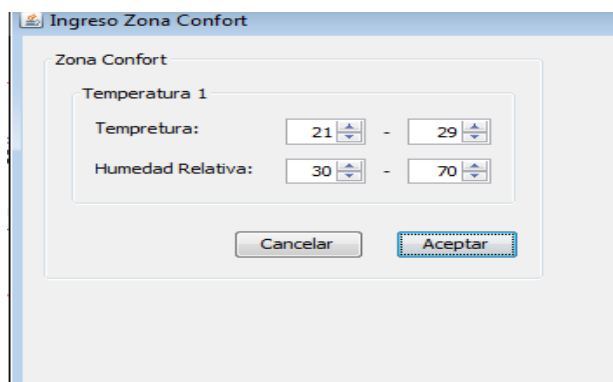


Fig.49. Ingreso de datos para el cálculo de la Zona de Confort



Diagrama Psicrométrico

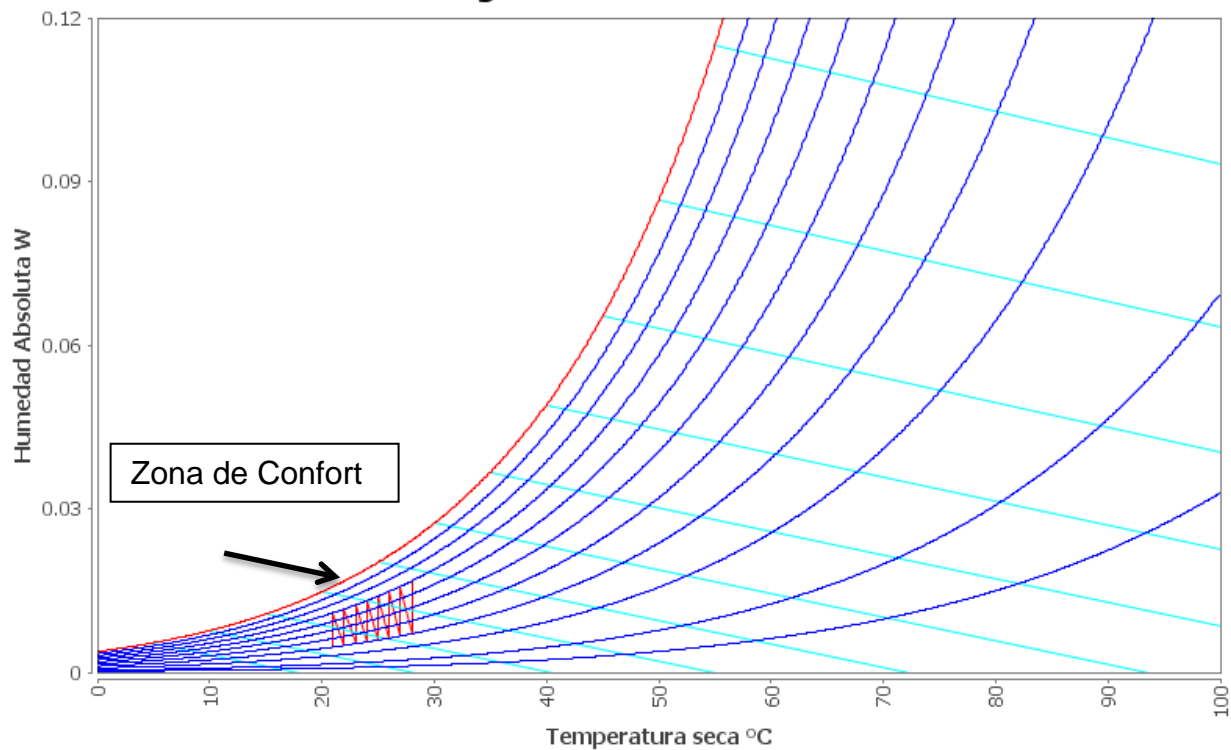


Fig.50. Diagrama de la zona de confort



UNIVERSIDAD DE CUENCA

8. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la elaboración de este estudio, se ha recurrido a fuentes bibliográficas como el texto “Problemas de Ingeniería Química” de Ocon-Tojo y además de páginas web en donde nos muestran las ecuaciones que nosotros hemos utilizado para la elaboración del simulador psicrométrico

Para el desarrollo en si del simulador hemos requerido de una computadora con las siguientes características: una computadora Sony VAIO®, con un procesador Intel Core, memoria RAM de 6GB, sistema operativo de 64 bits que trabaja con Windows 7 instalado en esta computadora Java JDK.



9. PROCEDIMIENTOS ESTADÍSTICOS DE ANÁLISIS DE DATOS

Para este procedimiento se determinará el porcentaje de error de la lectura determinada manualmente en la carta psicrométrica respecto a los valores que nos da el simulador.

En este caso tomaremos un ejemplo del libro de “Problemas de Ingeniería Química” de Ocón Tojo.

Ejemplos:

- 1) Una masa de aire a 40°C tiene una temperatura húmeda de 25°C. Empleando el diagrama psicrométrico, calcúlese:
 - a) Humedad absoluta
 - b) Humedad relativa
 - c) Temperatura de rocío
 - d) Calor específico
 - e) Volumen específico

Resultados:

Variables	Manualmente	Simulador	Error
Humedad Absoluta (Kgw/Kga)	0.0135	0.0136	0.741%
Humedad relativa (%)	31	29.38	5.226%
Temperatura de rocío (°C)	19.3	18.66	3.316%
Calor Específico (Kcal/Kg·°C)	0.248	0.2462	0.726%
Volumen específico (m3/Kg)	0.9	0.9048	0.533%

El diagrama se puede observar en el Anexo C

- 2) Un aire húmedo se encuentra a 30°C y una humedad absoluta de 0.012 Kgw/Kga.(presión atmosférica=0.972atm) Calcular:
 - a) Punto de rocío
 - b) Calor específico
 - c) Volumen específico
 - d) Entalpía específica



UNIVERSIDAD DE CUENCA

e) Resultados:

Variables	Manualmente	Simulador	Error
Temperatura de rocío ($^{\circ}\text{C}$)	16.4	16.31	0.549%
Calor Específico ($\text{Kcal/Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.2455	0.2455	0.000%
Volumen específico (m^3/Kg)	0.897	0.8989	0.212%
Entalpía específica	14.52	14.53	0.069%

El diagrama se puede observar en el Anexo D

3) Disponemos de 1000m^3 de aire a 50°C con una humedad relativa de 23.57%, y queremos que una vez mezclado con 2218m^3 de aire ambiente que se encuentra a 15°C con una humedad relativa del 50. Calcular:

- a) Temperatura final de la mezcla
- b) La humedad del aire resultante
- c) El volumen de aire resultante

Variables	Manualmente	Simulador	Error
Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$)	25	24.89	0.0044%
Humedad absoluta resultante (Kgw/Kga)	0.00	0.009	0%
Volumen de aire resultante	3220	321.44	0.900%

El diagrama se puede observar en el Anexo E



10. CONCLUSIONES

Con los ejemplos realizados tanto manualmente como el los utilizados por el simulador, podemos observar que el porcentaje de error es muy pequeño en la mayoría de los cálculos, esto se debe a que el simulador está operando con todos los decimales, igualmente en el ejemplo 2 se puede observar que cambiando la presión atmosférica se obtiene que el porcentaje de error es pequeño, por lo tanto podemos establecer que el programa cumple con los objetivos establecidos en este proyecto.

Con la realización de este proyecto se muestra la disminución en el tiempo ya que permite realizar los cálculos necesarios en un periodo de tiempo menos al que se ocuparía si se lee en un diagrama. En el desarrollo de este software se adquirió más conocimientos debido a la cantidad de conceptos que conlleva la psicrometría.

Para este proyecto se consultó varios textos relacionados con este tema tratando de proporcionar otros métodos para la obtención de los valores requeridos, se debe tomar en cuenta que las condiciones no son las mismas por lo que se debe realizar cambios en los valores debidos a la respectiva presión atmosférica.

Con este software fácil de usar, Java se aplicó para la simulación de los diferentes casos y métodos del aire húmedo. Este estudio mostró ser interactiva ya que se muestra las ecuaciones existentes con modo gráfico. Este software fue desarrollado para ser una herramienta interactiva e ilustrativa para la simulación psicrométrica del aire húmedo. También este simulador sirve para que tanto estudiantes y profesores tengan un mejor conocimiento sobre los procesos estudiados anteriormente ya que proporcionan un entorno ilustrativo para los investigadores para comprobaren las ecuaciones que se demuestran con el conocimiento existente.

Los autores hemos decidido que este software sea *freeware* o de distribución gratuita para el público en general, los archivos para el arranque del programa



UNIVERSIDAD DE CUENCA

descritos anteriormente están disponible en el CD anexo, que es parte del trabajo o por solicitud a través de e-mail: miltonpuzhi@gmail.com

11. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Dry Bulb, Wet Bulb and Dew Point Temperature. Obtenida el 29 de Noviembre del 2012, de http://www.engineeringtoolbox.com/dry-wet-bulb-dew-point-air-d_682.html)
- Java y sus funcionalidades. Obtenida el 29 de Noviembre del 2012 en <http://www.osmosislatina.com/java/>
- Miranda Ángel L. Fundamentos de Climatización. Editorial Alfa omega, primera edición. Impreso en México 2009.
- Ocón Joaquín y Gabriel Tojo. Problemas de Ingeniería Química Tomo I Aguilar SA. Tercera Edición Impreso en España 1978
- Perry Robert H; Don W. Green Manual de Ingeniero Químico Tomo IIMc Graw-Hill Interamericana Séptima Edición Impreso en España
- Pilatowsky Isaac Dr. Figueroa Psicrometría, métodos de humidificación y deshumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Singh R. Paul Dennis R. Heldman Introducción a la Ingeniería de los Alimentos Editorial Acribia, S.A. Segunda Edición Impreso en España 1998
- Tecnología Java. Obtenida el 29 de Noviembre de 2012 en <http://javaxyz.wikispaces.com/>



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Warren L. Mc Cabe, Julián C. Smith y Peter Harriot. Operaciones en Ingeniería Química. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana Séptima Edición Impresa en México



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXOS

Anexo A

Presiones de saturación del agua de la mezcla aire-agua ($P=1$ atm)

T (°C)	p_w^* (Atm)	T (°C)	p_w^* (Atm)	T (°C)	p_w^* (Atm)	T (°C)	p_w^* (Atm)
0	0.0060	26	299.15	51	0.1281	77	0.4139
1	0.0065	27	300.15	52	0.1345	78	0.4313
2	0.0070	28	301.15	53	0.1412	79	0.4493
3	0.0075	29	302.15	54	0.1482	80	0.4679
4	0.0080	30	303.15	55	0.1555	81	0.4872
5	0.0086	31	304.15	56	0.1631	82	0.5071
6	0.0092	32	305.15	57	0.1711	83	0.5277
7	0.0099	33	306.15	58	0.1793	84	0.5491
8	0.0106	34	307.15	59	0.1879	85	0.5711
9	0.0113	35	308.15	60	0.1968	86	0.5938
10	0.0121	36	309.15	61	0.2061	87	0.6174
11	0.0130	37	310.15	62	0.2158	88	0.6416
12	0.0138	38	311.15	63	0.2258	89	0.6667
13	0.0148	39	312.15	64	0.2363	90	0.6926
14	0.0158	40	313.15	65	0.2471	91	0.7194
15	0.0168	41	314.15	66	0.2584	92	0.7469
16	0.0179	42	315.15	67	0.2701	93	0.7754
17	0.0191	43	316.15	68	0.2822	94	0.8047
18	0.0204	44	317.15	69	0.2948	95	0.8350
19	0.0217	45	318.15	70	0.3079	96	0.8662
20	0.0231	46	319.15	71	0.3215	97	0.8984
21	0.0246	47	320.15	72	0.3355	98	0.9316
22	0.0261	48	321.15	73	0.3501	99	0.9657
23	0.0277	49	322.15	74	0.3652	100	1.0009
24	0.0295	50	323.15	75	0.3809		
25	0.0313	26	299.15	76	0.3971		



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXO B

Existen diversas formas de obtener Java para Windows además que es sencilla y gratuita. A continuación se indica los pasos a seguir para instalar Java en su ordenador.

Para ello necesitamos descargar el archivo Java JDK desde la página de java que es la siguiente: <http://www.java.com/es/> y guardamos en algún sitio del disco. Al descargar el archivo, damos doble clic para dar inicio a la instalación del programa.

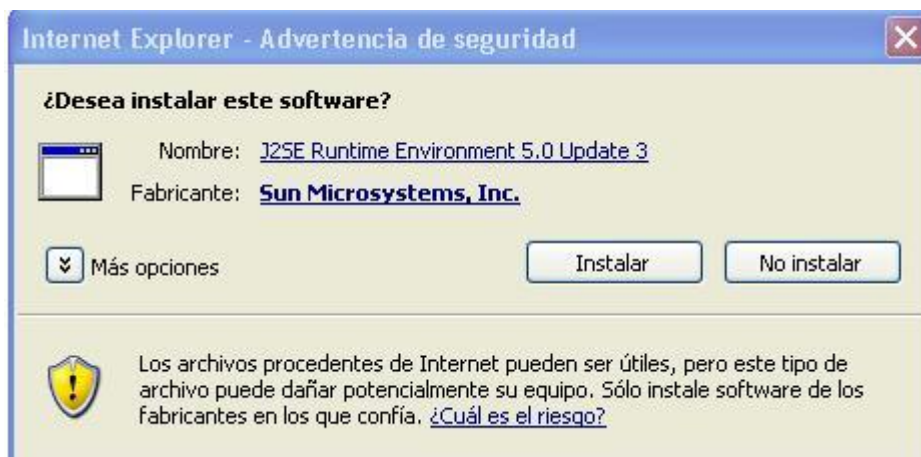


Fig.32 Instalación del archivo JDK

A continuación se copiará los archivos necesarios para la instalación de Java, al finalizar se iniciará automáticamente la instalación de Java.

En el siguiente paso, deberá *Aceptar los términos del contrato de licencia* y hacer clic en *Siguiente* y continuar con la instalación.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

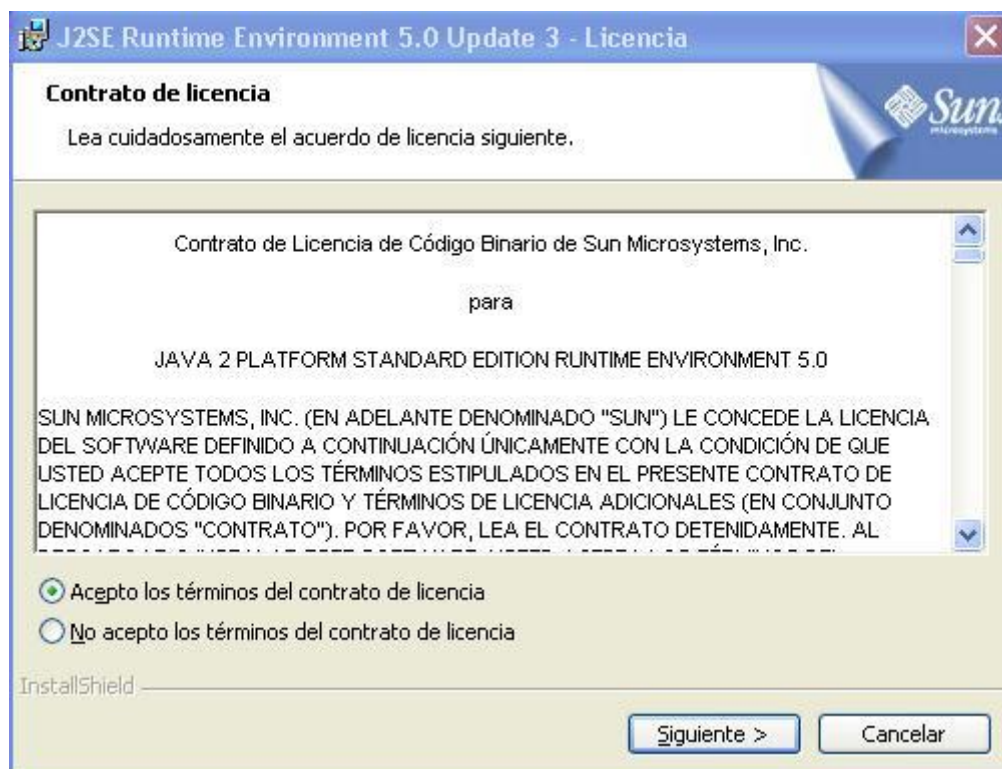


Fig.33. Contrato de licencia del programa.

El tipo de instalación a elegir es la Típica.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Fig.33. Tipo de instalación del programa.

Y se iniciará la instalación de Java.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

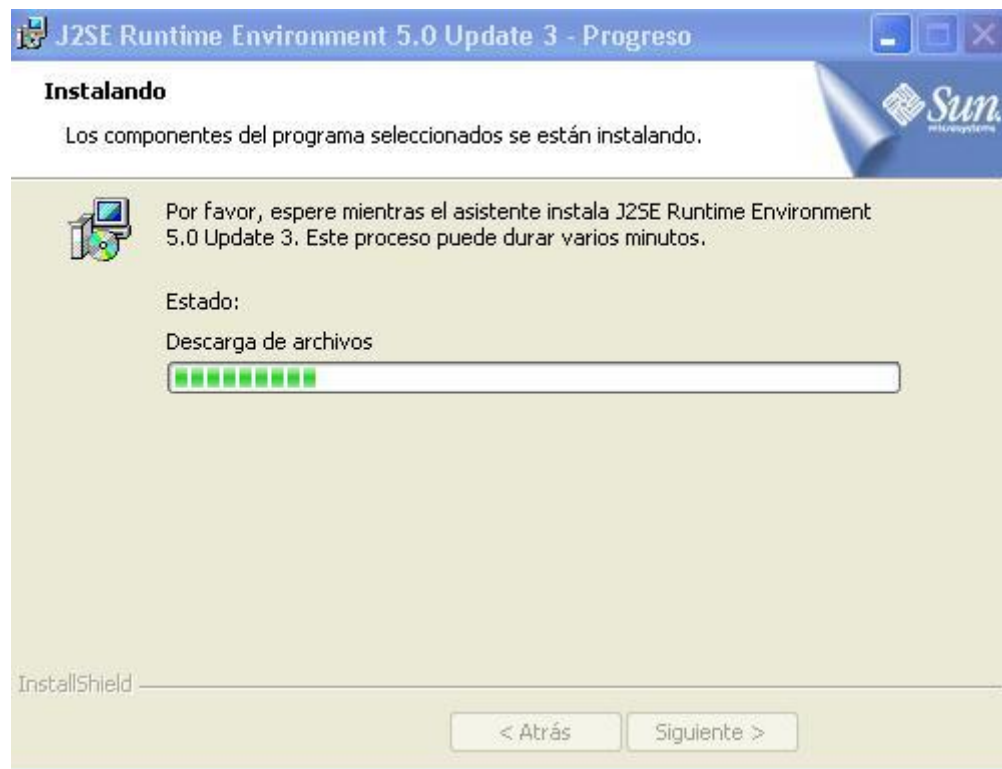


Fig.34. Proceso de instalación.

Por último haga clic en *Finalizar*.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Fig.35. Finalización de la instalación.

Para obtener e instalar Java para Linux siga estos pasos:

Vaya a <http://www.java.com/es/> y haga clic en descarga, en este caso existe dos paquetes de instalación.

- Java en plataforma Linux: este es un tipo de archive binario que puede instalar en cualquier ubicación en la que se pueda escribir, pero sólo el usuario de raíz puede instalar Java en la ubicación del sistema.
- Java en plataforma Linux basadas en RPM: son plataformas basadas en 32Bits y utilizan un archivo binario RPM en la ubicación del sistema.

Escoja el paquete que mejor se ajuste a sus necesidades.

Para la instalación en Java en plataforma Linux siga las siguientes instrucciones:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Cambie al directorio en el que desee efectuar la instalación, escriba `cd <nombre de ruta de acceso del directorio>`
- Mueva el archivo binario de almacenamiento `.tar.gz` al directorio actual.
- Desempaquete el tarball e instale Java.

Los archivos de Java se instalarán en un directorio llamado `jre1.7.0_7` en el directorio actual. Una vez finalizada la instalación se mostrará la palabra Terminado.

Para la instalación en Java en plataforma Linux basada en RPM siga las siguientes instrucciones:

- Para convertirse en usuario raíz ejecute el comando `su` y a continuación introduzca la contraseña del superusuario.
- Desinstale todas las instalaciones anteriores de los paquetes de Java. `rpm -e <nombre_paquete>`
- Cambie al directorio en el que desee efectuar la instalación.
- Instale el paquete.
- Suprima el archivo `.rpm` si desea ahorrar espacio.
- Salga del Shell de raíz.

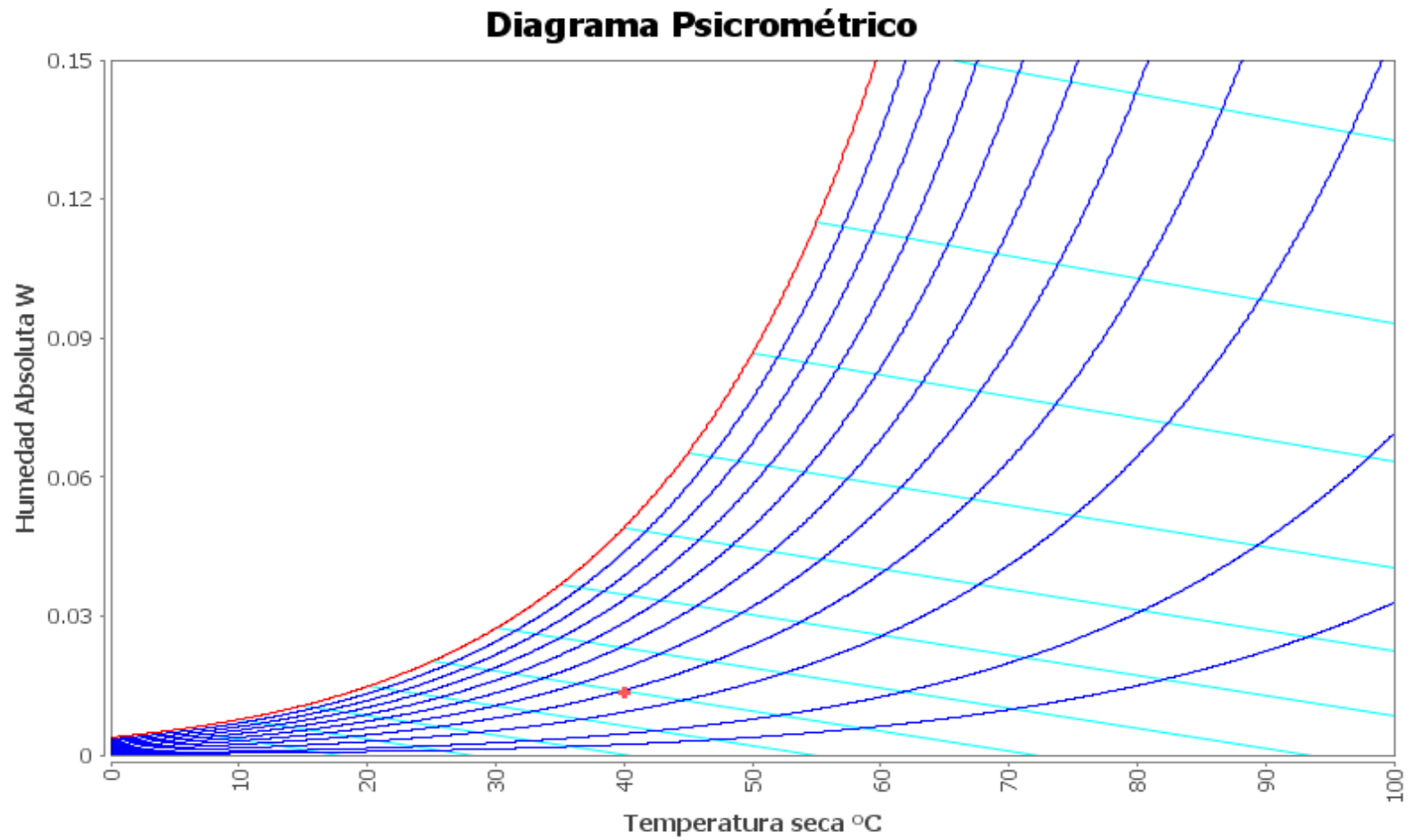
Y la instalación ha finalizado.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXO C.

Diagrama psicrométrico del ejemplo N°1

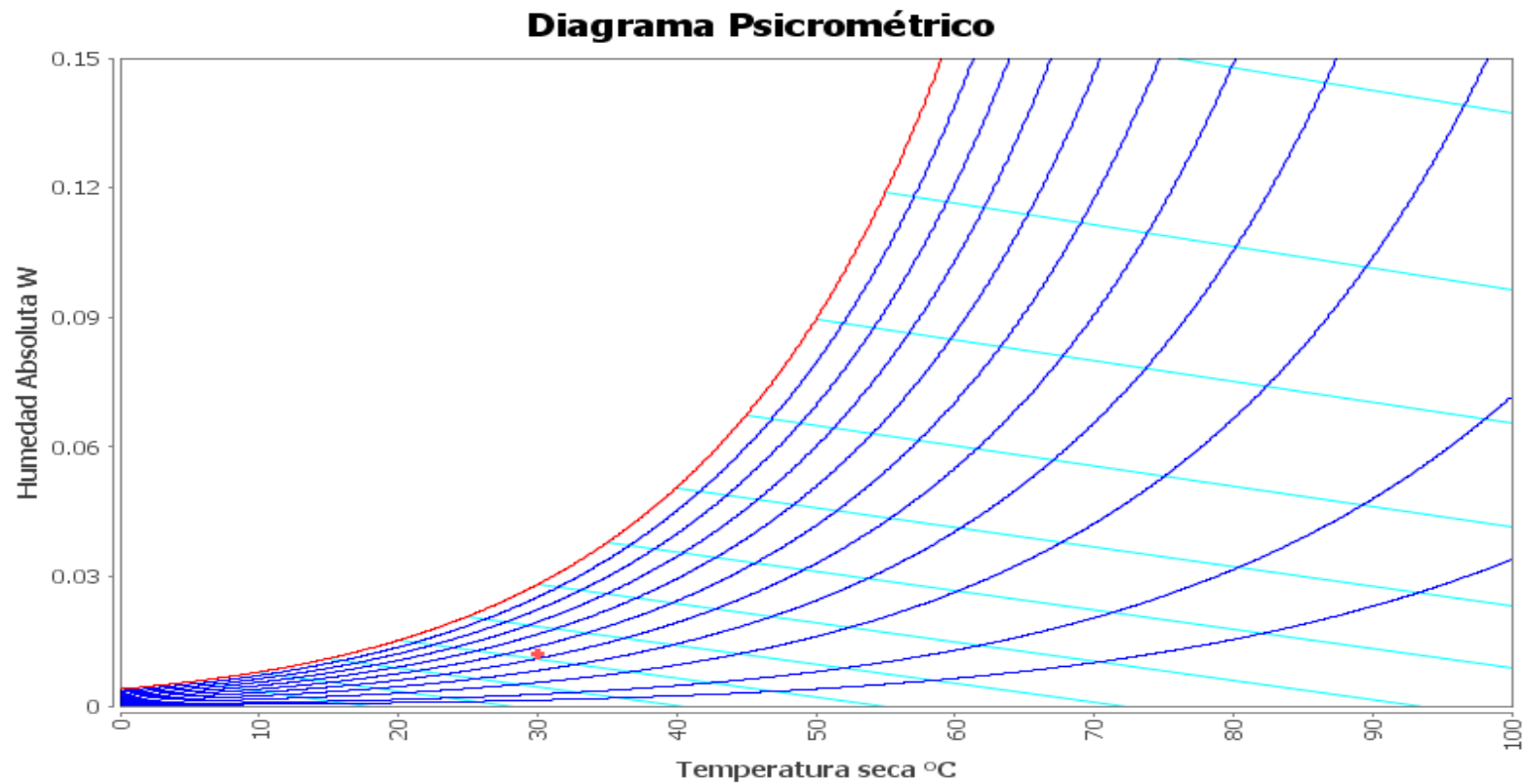




UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXO D.

Diagrama psicrométrico del ejemplo N°2



ANEXO E.

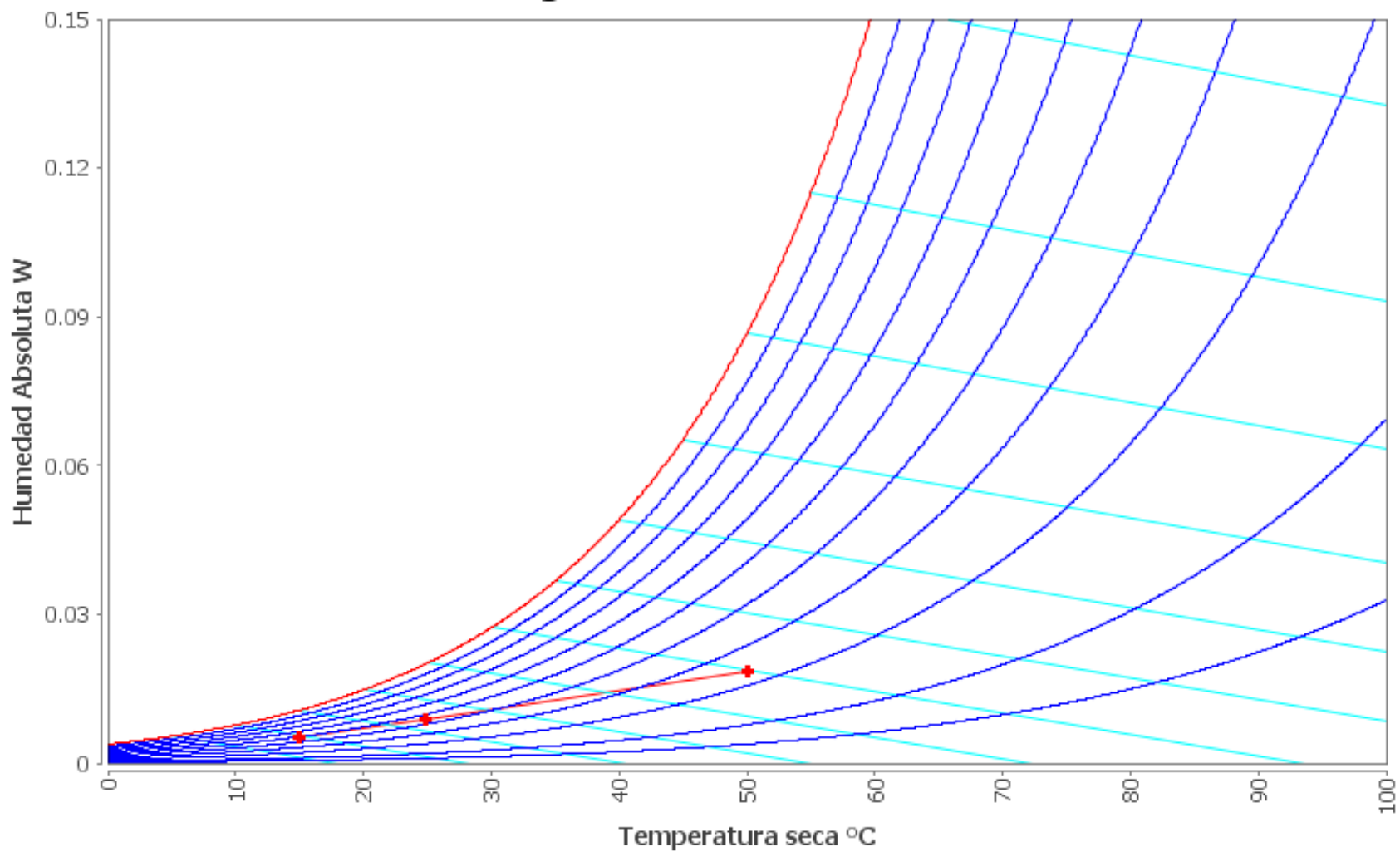
Milton Vinicio Puzhi Morales
Saúl Marcelo Zhinin Lazo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Diagrama psicrométrico del ejemplo N°3

Diagrama Psicrométrico





ANEXO F.

Nomenclatura

a = Aire seco

w = Vapor de agua.

C = Calor específico, Kcal/ Kg.°C

C_H = Calor específico del gas húmedo, Kcal/ Kg aire.°C.

c = Coeficiente de convección, Kcal/ m²·h.°C

c_{pa} = calor específico del aire a presión constante.

c_{pw} = calor específico del vapor de agua a presión constante.

H = Entalpía específica, Kcal/Kg.

h_c = coeficiente de convección líquido-gas.

h = Entalpía del líquido.

K = Conductividad, Kcal/mh°C.

K_G = coeficiente de transporte de materia, tomando como potencial de difusión la presión de vapor.

K_w = coeficiente de transporte de materia, tomando como potencial de difusión la saturación absoluta.

L = Caudal másico, Kg/h.

M_a = Masa molecular del aire seco, kg/Kmol

M_w = Masa molecular del vapor de agua, kg/Kmol

m_L = Masa del líquido, Kg



UNIVERSIDAD DE CUENCA

m_s = Masa del sólido, Kg

G = Masa del vapor de agua.

G^* = Masa de vapor de agua en condiciones de saturación.

N_W = Número de moléculas del vapor de agua.

N_L = Número de moléculas del líquido.

n_w = Número de moles del vapor de agua, mol.

n_a = Número de moles del aire seco, mol.

p_w^* = Presión de saturación del vapor de agua, atm.

P = Presión atmosférica, atm.

p = Presión atmosférica, atm.

p_w = Presión parcial del vapor de agua, atm

p_a = Presión parcial del aire seco, atm

Pr = Módulo de Prandtl.

q = Cantidad de calor intercambiado.

R_a = Constante del aire seco, KJ/Kg·°K.

R_w = Constante del vapor de agua, KJ/Kg·°K.

R = Constante de los gases ideales, 8,3143J/Mol·°K=0.082 atm·Lt/°K·mol

Sc = Módulo adimensional de Schmidt.

T = Temperatura absoluta, °K.

t = temperatura, °C.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

t_{bs} = Temperatura de bulbo seco, °C.

t_{bh} = Temperatura de bulbo húmedo, °C.

t_r = Temperatura de punto de rocío, °C.

t_s = Temperatura de saturación adiabática, °C.

t_e = temperatura de entrada, °C.

t_o = Temperatura referida a 0°C.

U = Coeficiente integral de transmisión de calor, Kcal/ m²·h·°C

V = Volumen, Lt

V_{esp} = Volumen específico, m³/ Kg de aire.

W_M = Humedad molar, moles de vapor de agua/moles de aire.

W = Humedad absoluta, Kg de vapor de agua/Kg de aire seco.

W_R = Humedad Relativa. %.

W_p = Humedad porcentual.

W^* = Humedad en condiciones de saturación, Kg de vapor de agua/Kg de aire seco.

x_w = Fracción molar del vapor de agua.

x_a = Fracción molar del aire seco.

Z = Altura, m

Letras Griegas.

λ = Calor latente de vaporización, Kcal/Kg



UNIVERSIDAD DE CUENCA

λ_o = Calor latente de vaporización referida a 0°C.

λ_L = Calor de vaporización del líquido.

μ = Viscosidad absoluta, Kg/hm.

ρ = Densidad, Kg/m³

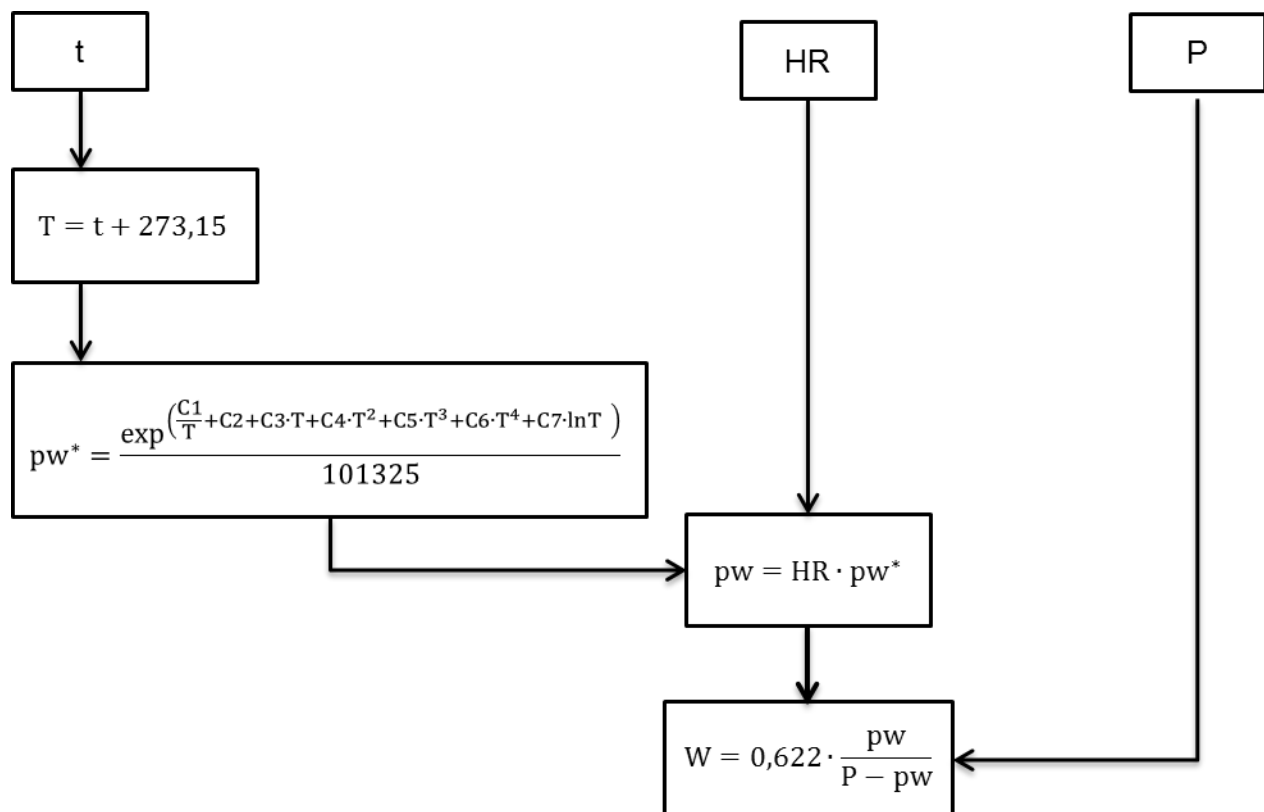


ANEXO G

Formulario

- Caso 1: Temperatura-Humedad relativa

:

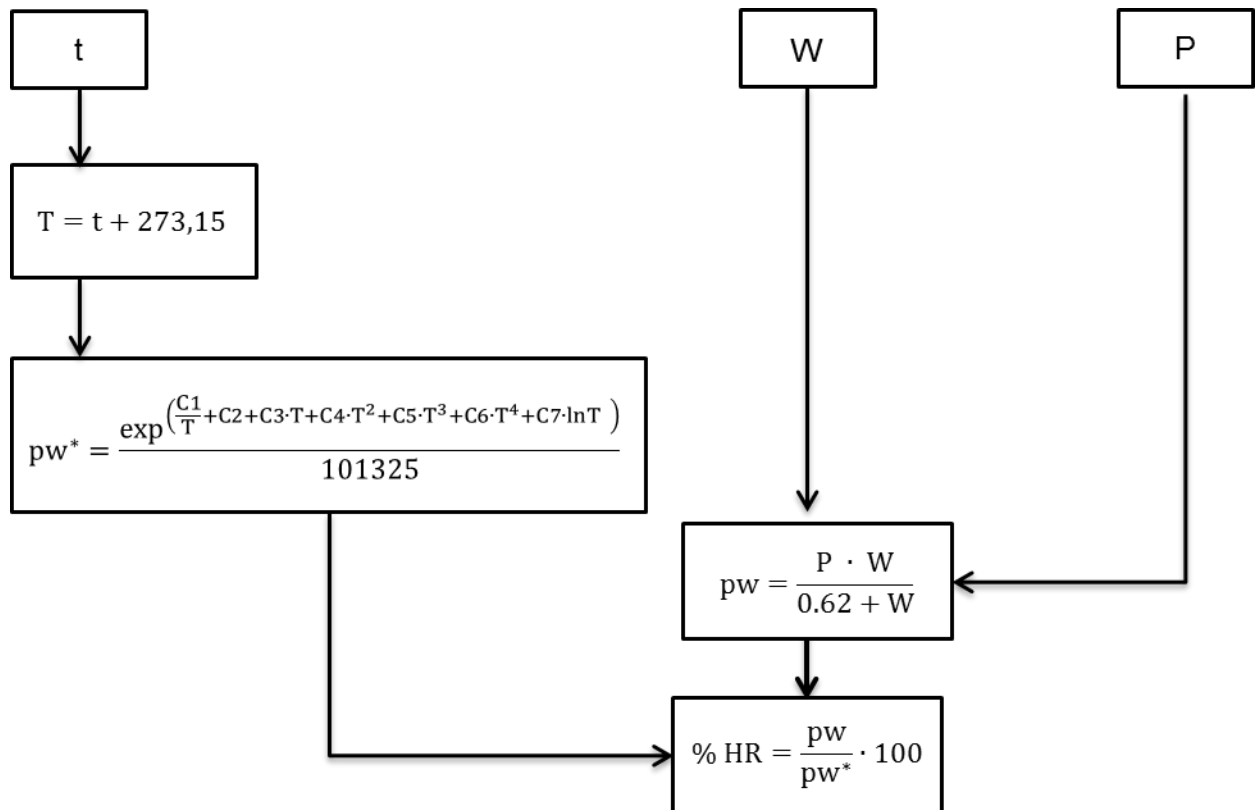


Para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, ver diagrama: Tanteo N°1. Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

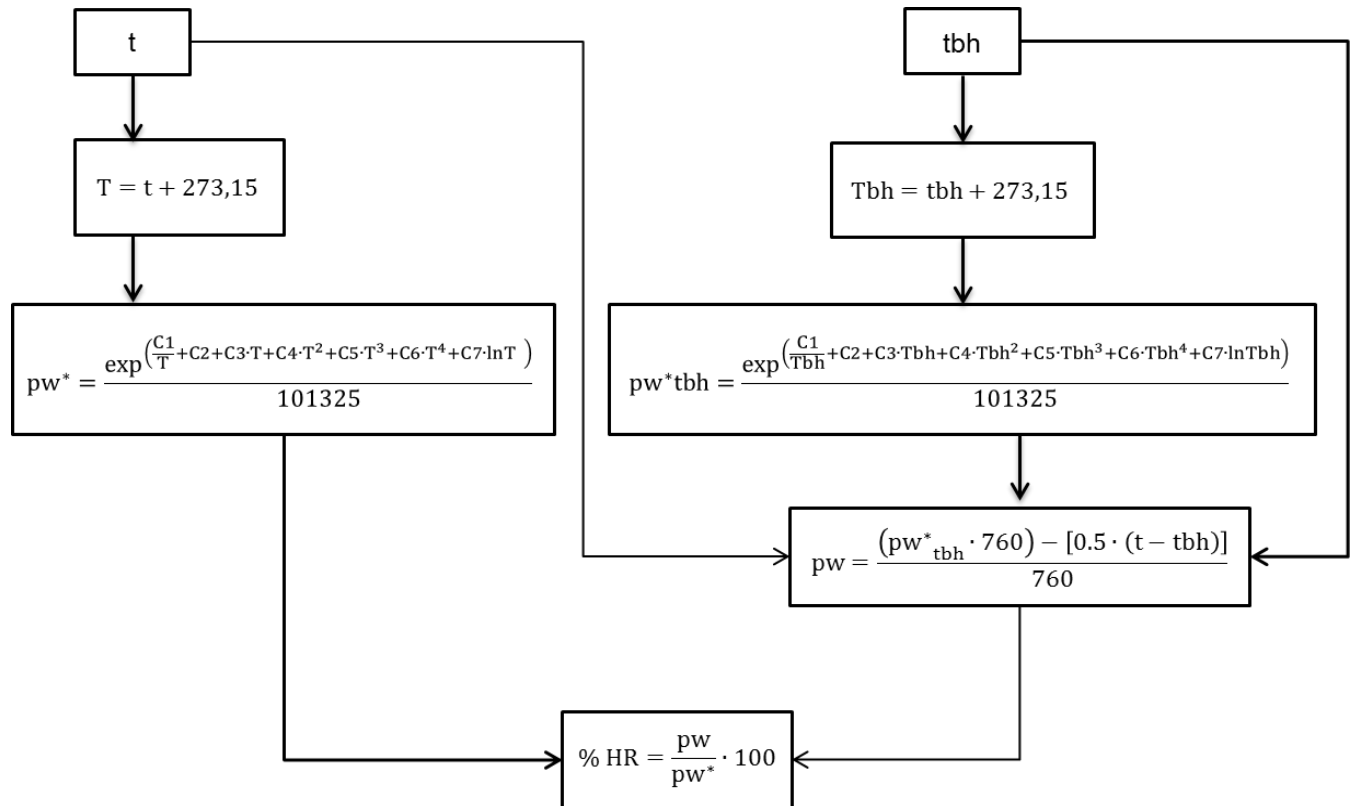
- Caso 2: Temperatura-Humedad absoluta



Para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, ver diagrama: Tanteo N°1. Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo.



- Caso 3: Temperatura-temperatura de bulbo húmedo

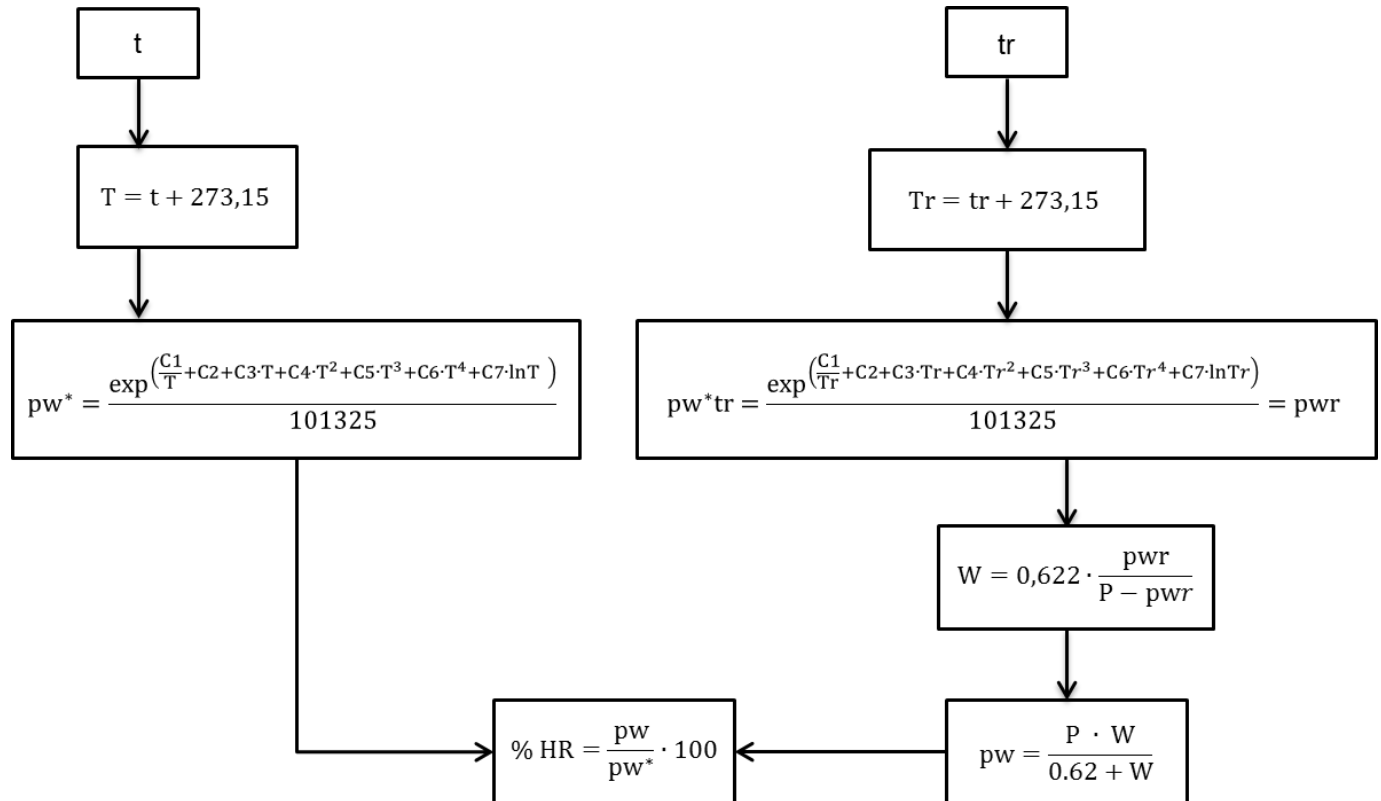


Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Caso 4: Temperatura-temperatura de rocío

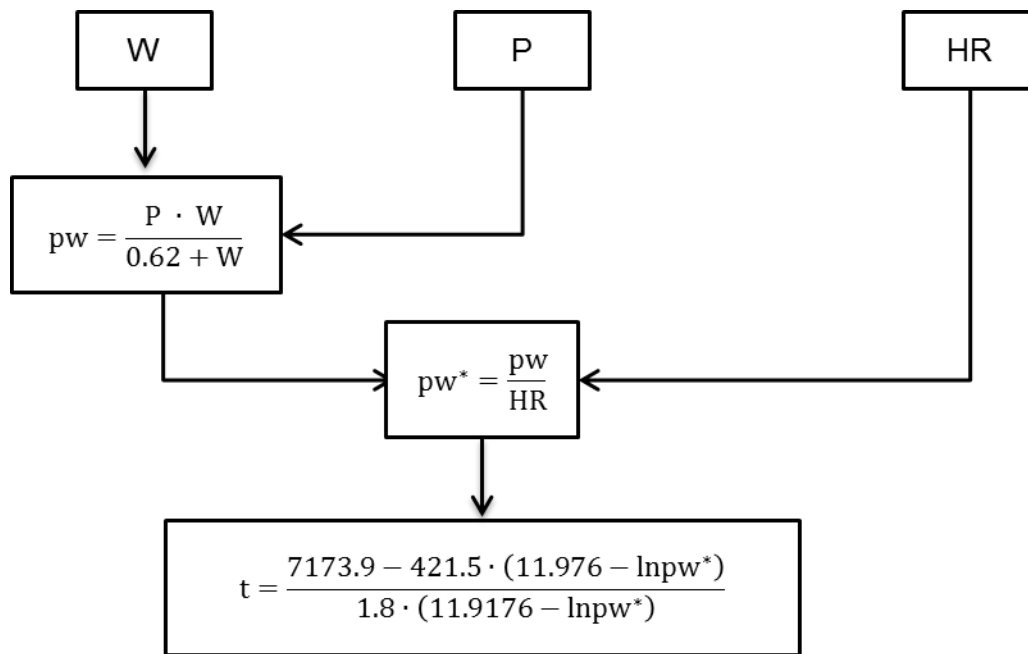


Para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, ver diagrama: Tanteo N°1. Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Caso 5: Humedad Absoluta y Humedad Relativa

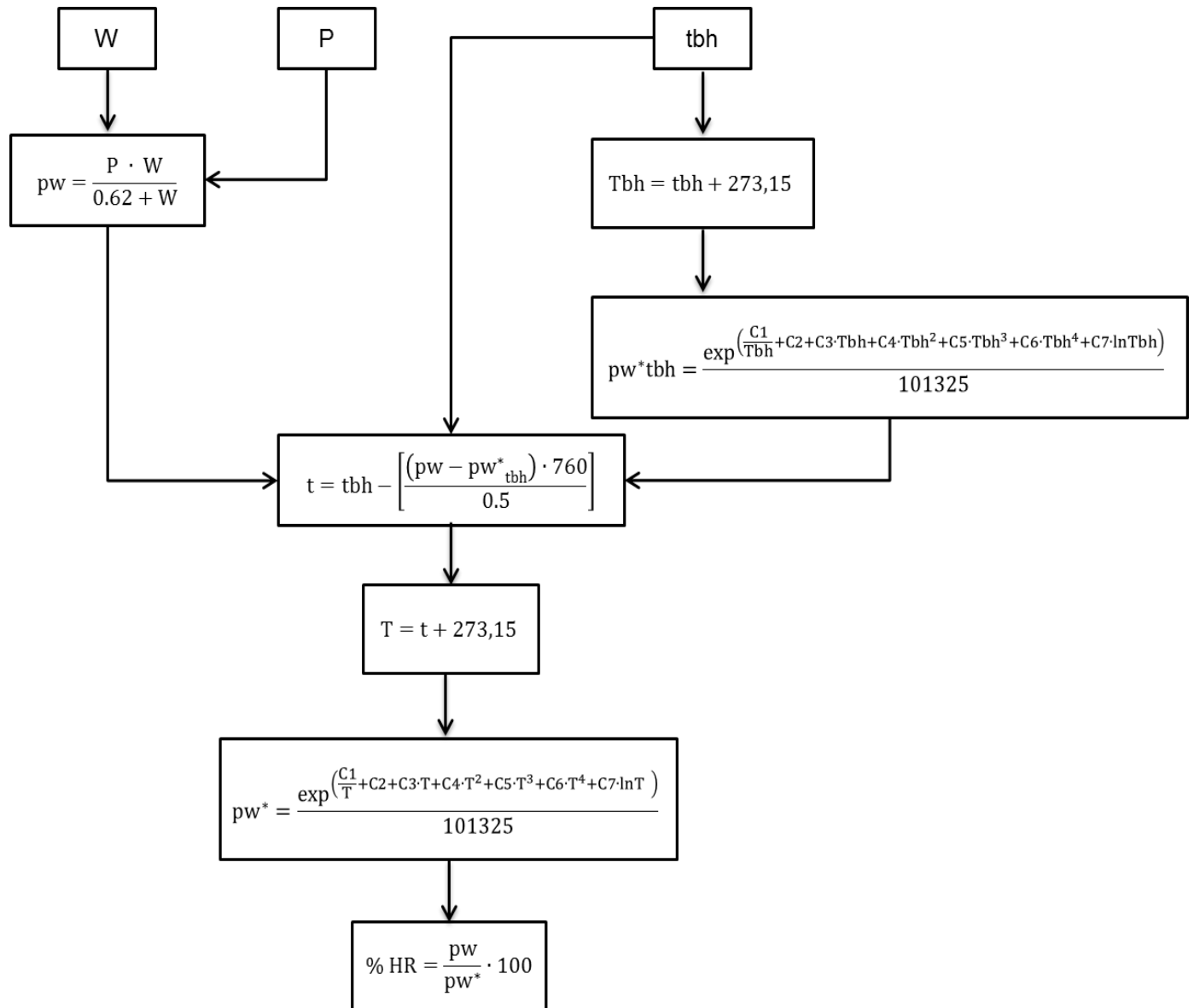


Para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, ver diagrama: Tanteo N°1. Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Caso 6: Humedad Absoluta y temperatura de bulbo húmedo

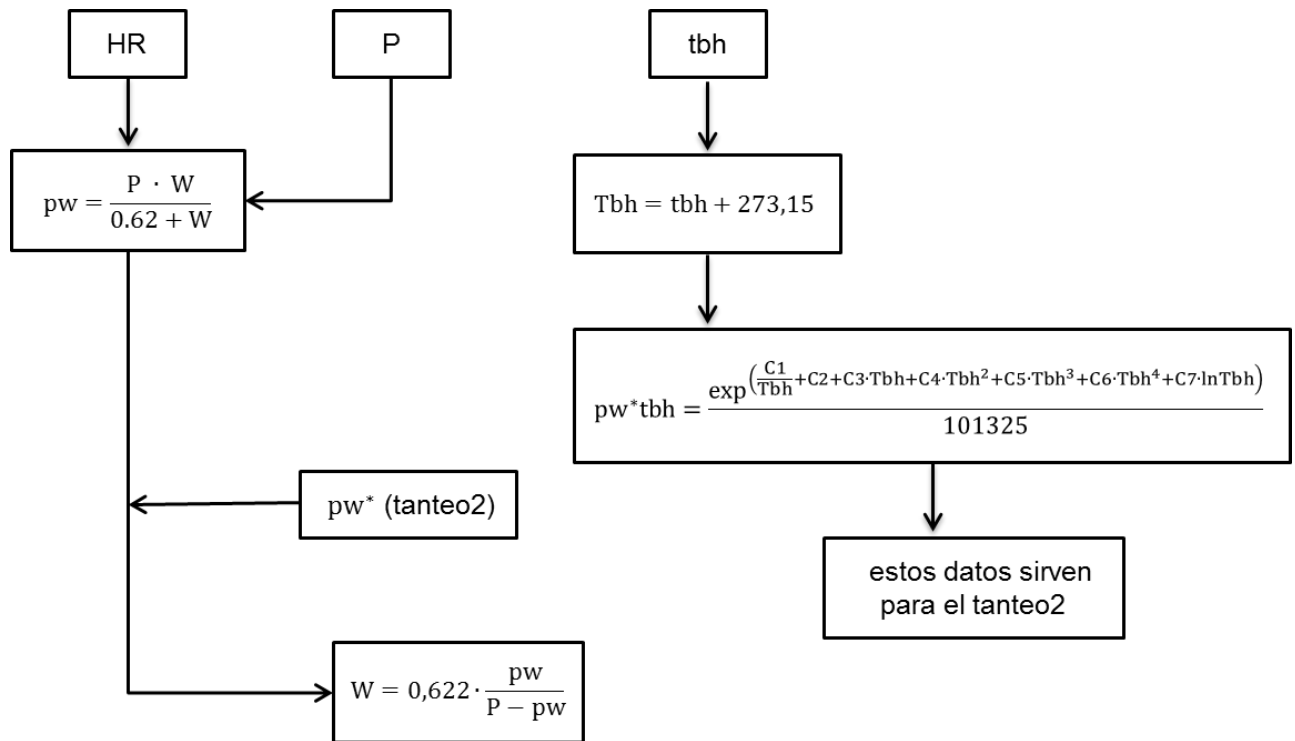


Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Caso 7: Humedad relativa y temperatura de bulbo húmedo

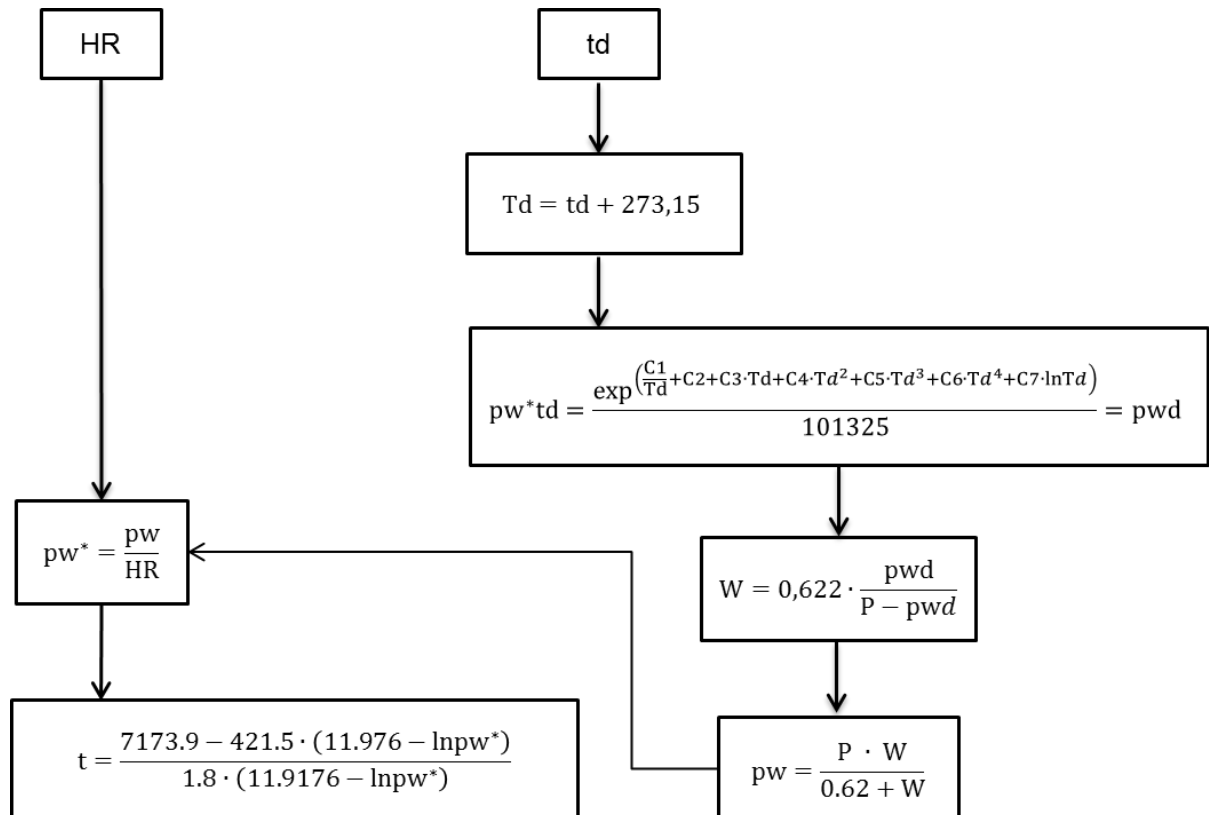


Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Caso 8: Humedad relativa y temperatura de rocío

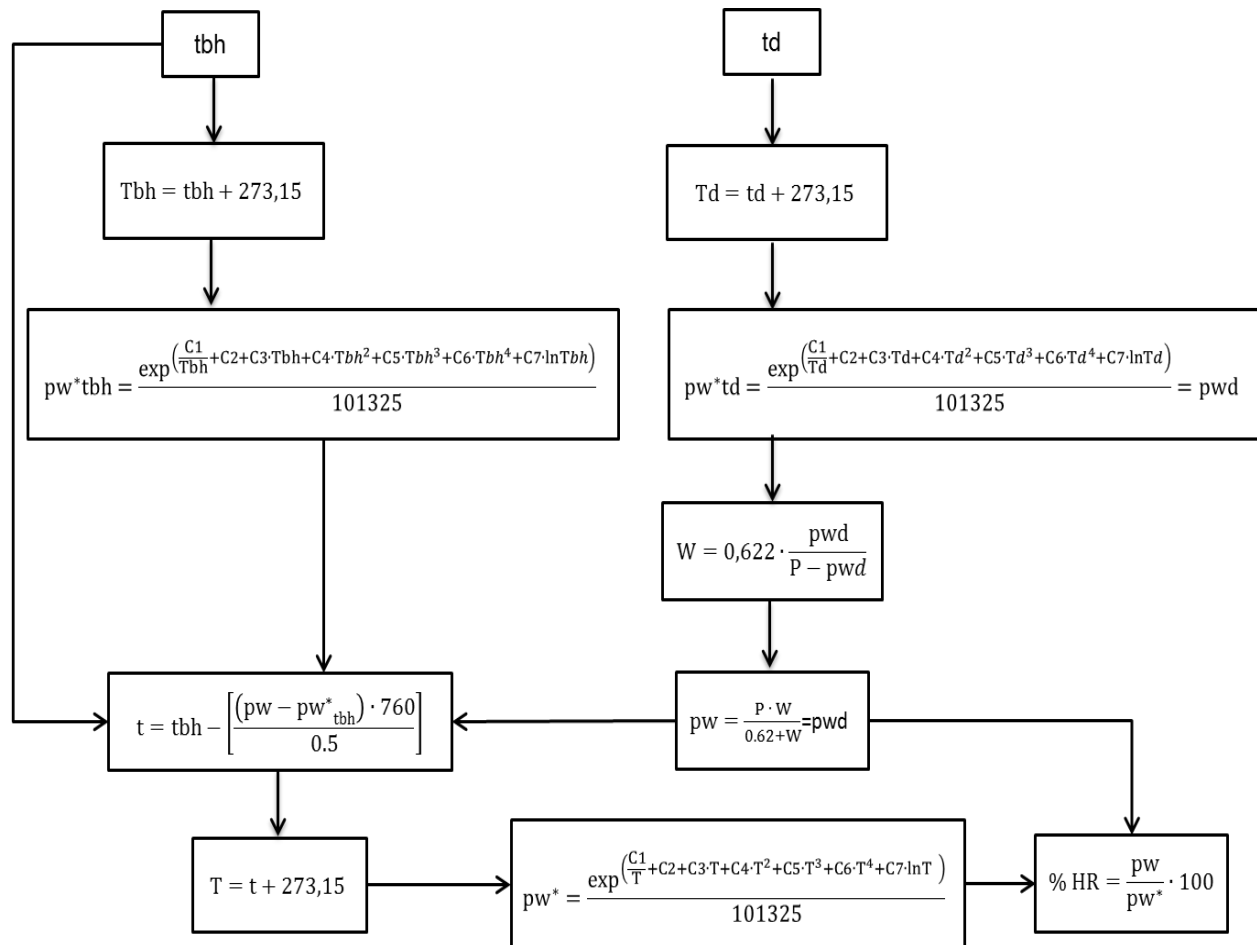


Para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, ver diagrama: Tanteo N°1. Las demás variables psicrométricas se obtiene por simple cálculo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

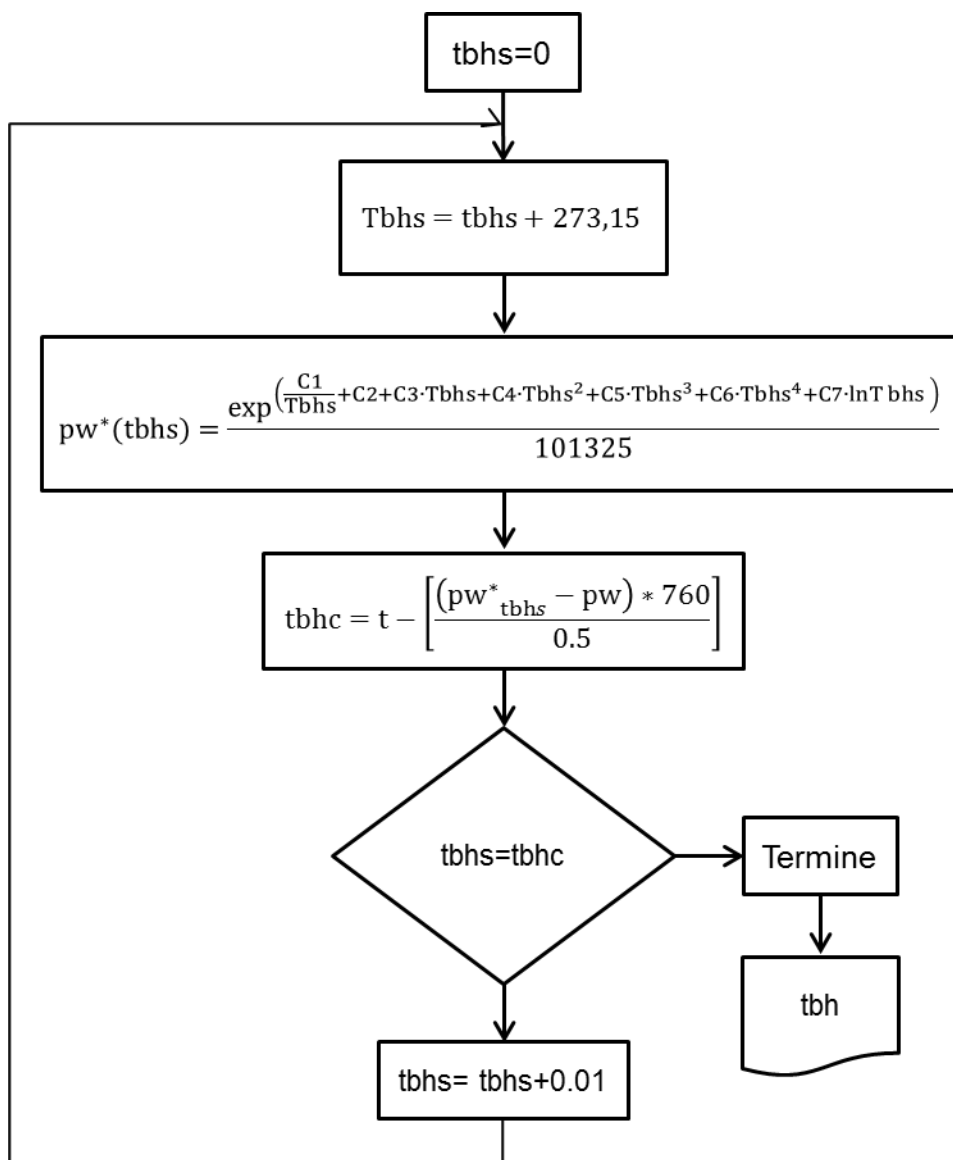
- Caso 9: temperatura de bulbo húmedo y temperatura de rocío.





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tanteo N°1





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tanteo N°2

